



Caractérisation géométrique des assemblages flexibles par la mesure

Cyril Lacroix

► To cite this version:

Cyril Lacroix. Caractérisation géométrique des assemblages flexibles par la mesure. Autre. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2015. Français. NNT : 2015DENS0031 . tel-01228747

HAL Id: tel-01228747

<https://theses.hal.science/tel-01228747>

Submitted on 13 Nov 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ENSC-2015 n°590

**THESE DE DOCTORAT
DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN**

Présentée par

Cyril LACROIX

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN

Domaine :

MECANIQUE – GENIE MECANIQUE – GENIE CIVIL

Titre de la thèse :

Caractérisation Géométrique des Assemblages Flexibles par la Mesure

Thèse soutenue à Cachan le 8 juillet 2015 devant le jury composé de :

Jean-François FONTAINE	Professeur des Universités, Université de Bourgogne	Rapporteur
Serge SAMPER	Professeur des Universités, Université de Rennes 1	Rapporteur - Président
Alex BALLU	Maître de Conférences HDR, Université de Bordeaux	Examineur
Hugo FALGARONE	Expert, Airbus Group Innovations	Invité
Luc MATHIEU	Professeur des Universités, Université Paris Sud	Directeur de thèse
François THIEBAUT	Maître de Conférences, Université Paris Sud	Co-Encadrant de thèse



Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée
ENS de Cachan / Université Paris-Sud / EA 1385
61 avenue du Président Wilson
94235 CACHAN Cedex (France)

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier Jean-François Fontaine et Serge Samper d'avoir accepté de rapporter ce manuscrit de thèse. Je les remercie pour le temps qu'ils m'ont accordé et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux. Je remercie de plus Serge Samper d'avoir endossé le rôle de président du jury. Je remercie également Alex Ballu d'avoir accepté de faire partie du jury et d'examiner mes travaux.

Je remercie également Hugo Falgarone d'avoir accepté de faire partie du jury en sa qualité d'expert industriel, mais surtout d'avoir suivi de près mes travaux durant trois ans et d'avoir toujours répondu présent lorsque j'ai eu besoin de son aide.

Je remercie bien sûr Luc Mathieu et François Thiébaud de m'avoir fait confiance. Je les remercie pour leur aide et leur patience, ainsi que pour la liberté qu'ils m'ont laissé pour la réalisation de ces travaux. Leurs encouragements durant la phase de rédaction ont également été très importants pour moi. Merci à Luc pour sa rigueur, et à François pour son ingéniosité. J'espère que cette expérience scientifique et humaine leur aura apporté autant qu'à moi.

Je remercie ensuite tous mes collègues du *LURPA*, pour l'aide qu'ils ont pu m'apporter, mais avant tout pour leur bonne humeur au quotidien. Je tiens à remercier plus particulièrement :

- ✦ Les étudiants et thésards que j'ai côtoyé durant ces trois années, qui animent la vie au laboratoire,
- ✦ Le Civil, et tous ses anciens membres, pour toutes les activités diverses et variées organisées,
- ✦ Mes compères du midi, thésards et permanents, pour toutes ces discussions partagées durant nos repas ou autour d'un café,
- ✦ Pierre-Antoine Brameret, mon compère de rédaction, pour tous ces moments de décompression nécessaires durant la rédaction,
- ✦ Loïc Andolfatto et Nicolas Audfray, pour l'aide qu'ils m'ont apporté au début de mes travaux,
- ✦ Claire Lartigue, Nabil Anwer, Yann Quinsat et Bernard Anselmetti, pour m'avoir aidé à préparer la soutenance, pour le temps qu'ils m'ont accordé et pour leurs précieux conseils.

Je remercie aussi tous les membres du projet européen *LOCOMACHS* avec lesquels j'ai pu travailler, et plus particulièrement Jérôme Coloos pour le temps qu'il m'a accordé, et pour l'aide qu'il a pu m'apporter pour faciliter ma compréhension des modélisations utilisées pour la simulation d'assemblage.

Je remercie également tous ceux qui ont fait de ces sept années passées à Cachan une période inoubliable, mes collègues de promo, les VPs, l'Aspique, mes collègues de muscu, et tous les autres, jeunes et moins jeunes. Un merci particulier à tous ceux qui étaient présents pour m'encourager le jour de ma soutenance, et qui ont participé au bon déroulement de cette journée particulière.

Je remercie enfin ceux qui ont suivi mes travaux de loin. D'abord mes amis qui m'ont toujours soutenu malgré la distance, et qui ont toujours été disponibles lorsque j'étais de passage. Enfin ma famille, qui a toujours cru en moi, et qui a fait énormément de sacrifices afin de me permettre d'en arriver là. Ce manuscrit, et le titre qui l'accompagne, ce sont avant tout les symboles de leur réussite.

Enfin, une dernière pensée pour ceux que mes travaux auraient rendu les plus fiers, mais qui nous ont quitté beaucoup trop tôt...

Table des matières

Remerciements	iii
Table des matières	v
Table des figures	ix
Liste des tableaux	xv
Introduction	1
1 Processus d'assemblage de structures aéronautiques	5
1 Introduction	7
2 Assemblages de structures aéronautiques	7
2.1 Géométries typiques	8
2.2 Matériaux typiques	9
2.3 Contexte de l'étude	10
3 Processus industriel d'assemblage aéronautique	12
3.1 Description du processus	12
3.2 Outils et technologies spécifiques	15
3.3 Limites actuelles	15
4 Tolérancement et assistance à l'assemblage	16
4.1 Méthodes et outils de tolérancement	17
4.2 Assistance à l'assemblage par la mesure	18
5 Positionnement des travaux	19
5.1 Validation expérimentale de simulations d'assemblage	20
5.2 Contexte du projet européen <i>LOCOMACHS</i>	25
5.3 Contexte des travaux de thèse	26
2 Grandeurs caractéristiques d'un assemblage flexible	27
1 Introduction	29
2 Caractéristiques clés d'un assemblage flexible	29
2.1 Etat de l'art	30
2.1.1 Notion de caractéristique clé	30
2.1.2 La caractéristique géométrique clé d'un assemblage de structure aéronautique composite : le jeu	31
2.1.3 Spécificités liées à la souplesse des composants	34
2.1.4 Des caractéristiques composants aux caractéristiques du produit assemblé	35
2.2 Synthèse	37
3 Caractérisation géométrique	38
3.1 Etat de l'art	38

3.1.1	Caractérisation des écarts géométriques au niveau du composant	38
3.1.2	Caractérisation du comportement mécanique du composant	40
3.1.3	Caractérisation des écarts géométriques au niveau des liaisons	41
3.2	Synthèse	42
4	Etude du processus de simulation d'assemblage flexible	43
4.1	Représentation des géométries au sein des différents environnements	43
4.1.1	Conception	44
4.1.2	Simulation	45
4.1.3	Mesure	45
4.1.4	Synthèse	46
4.2	Evaluation des écarts géométriques en vue de la simulation d'assemblage	47
4.2.1	Eléments géométriques typiques des assemblages de structures aéronautiques	47
4.2.2	Evaluation et représentation des écarts géométriques	48
4.3	Caractérisation géométrique du jeu spécifique au contexte industriel	52
5	Conclusion	55
3	Evaluation par la mesure de caractéristiques sur des composants souples	57
1	Introduction	59
2	Métrologie des composants souples	60
2.1	Etat de l'art	60
2.1.1	Systèmes de mise en position	60
2.1.2	Acquisition	63
2.1.3	Traitement des nuages de points	64
2.1.4	Recalage non-rigide des mesures	67
2.1.5	Représentation modale	72
2.2	Synthèse	75
3	Méthode d'évaluation de caractéristiques sur des composants souples	76
3.1	Principe de la méthode	77
3.2	Hypothèses principales sur lesquelles repose la méthode	79
3.2.1	Petites déformées et petits défauts de forme	79
3.2.2	Repères d'expression des géométries	79
3.2.3	Représentation homogène des géométries	80
3.2.4	Limitation des incertitudes	81
3.3	Nature des défauts et déformées représentables	82
4	Illustration de la méthode	84
4.1	Système de mesure utilisé	84
4.2	Support de démonstration	85
4.3	Evaluation de la géométrie de la forme réelle contrainte par la mesure	87
4.3.1	Acquisition	87
4.3.2	Traitement	88
4.4	Evaluation de la déformée due à l'environnement qui contraint le composant par la simulation	93
4.4.1	Modélisation de la géométrie du composant	93
4.4.2	Modélisation de la configuration de mesure	94
4.4.3	Modélisation du comportement mécanique	95
4.4.4	Simulation numérique et compensation	95
4.5	Synthèse	96
5	Conclusion	97

4	Evaluation du jeu dans un assemblage	99
1	Introduction	101
2	Evaluation du jeu par la mesure	101
2.1	Etat de l'art	102
2.2	Synthèse	105
3	Choix d'une méthode d'évaluation de jeu par la mesure	105
3.1	Méthodes d'évaluation de jeu par la mesure non retenues dans le contexte	106
3.2	Méthodes d'évaluation de jeu par la mesure envisagées	106
3.2.1	Mesure à l'aide d'un jeu de cales d'épaisseur	106
3.2.2	Mesure par prise d'empreintes	107
3.2.3	Mesure indirecte par différence	109
3.3	Synthèse et choix d'une méthode d'évaluation de jeu par la mesure adaptée au contexte	110
4	Evaluation de jeu par la simulation	111
4.1	Contexte de la simulation d'assemblage en rigide	111
4.2	Procédure expérimentale	113
4.2.1	Mesure des composants	114
4.2.2	Intégration des données de mesure dans la simulation	115
4.2.3	Simulation de jeu en rigide	115
4.2.4	Simulation de jeu en flexible	118
4.3	Synthèse	119
5	Conclusion	120
5	Validation expérimentale des travaux de thèse	121
1	Introduction	123
2	Caractéristiques du support expérimental	124
2.1	Support expérimental	124
2.1.1	Démonstrateur du projet <i>LOCOMACHS</i>	124
2.1.2	Support expérimental conçu pour la validation	125
2.2	Modélisation du problème d'assemblage	127
2.2.1	Modélisation géométrique et mécanique	127
2.2.2	Scénario d'assemblage	129
3	Evaluation de caractéristiques géométriques	132
3.1	Description de la mise en œuvre	132
3.2	Validation expérimentale de la méthode	135
3.2.1	Validation par différence de deux géométries à l'état libres évaluées dans deux configurations différentes	135
3.2.2	Validation par comparaison à la géométrie à l'état libre obtenue par retournement	137
4	Analyse de sensibilité	142
4.1	Sélection des paramètres influents	143
4.2	Sensibilité au niveau de l'acquisition et du traitement	144
4.2.1	Données concernant le système d'acquisition	144
4.2.2	Répétabilité de génération d'un champ d'écarts	144
4.2.3	Effets de la thermique sur le capteur	145
4.2.4	Influence du recalage rigide	150
4.2.5	Dimension du filtre	151
4.3	Sensibilité au niveau du recalage non rigide	152
4.3.1	Simplification et idéalisation de la géométrie	153

4.3.2	Perturbations extérieures	154
4.3.3	Paramètres matériau	157
4.3.4	Position d'un appui	161
4.4	Synthèse et définition d'un cadre pour la mise en œuvre de la méthode	162
5	Simulation de jeu	163
5.1	Modélisation de l'assemblage en vue de la simulation	164
5.2	Simulation d'assemblage et évaluation du jeu simulé	166
5.3	Analyse des résultats	169
6	Assemblage expérimental et mesure du jeu	170
6.1	Description de l'assemblage expérimental	170
6.2	Évaluation du jeu	170
6.2.1	Mesure par prise d'empreintes	172
6.2.2	Mesure par différence	174
6.3	Analyse des résultats	176
6.4	Comparaison des jeux simulés et mesurés	179
7	Conclusion	181
Conclusions et perspectives		183
Références		187
Annexes		I
A Diagrammes de causes et effets		I
B Séquence d'assemblage du démonstrateur LAWiB		VII
C Nomenclature du support expérimental		XIII
D Résultats de qualification du système de mesure utilisé		XVII
E Variation des champs d'écart étudiée dans différentes sections		XXI

Table des figures

1	Partenaires au sein du projet européen LOCOMACHS.	2
1.1	Sous-ensemble de structure aéronautique (démonstrateur <i>LAWiB</i>) [LOCOMACHS, 2012]. . .	8
1.2	Evolution des matériaux utilisés pour la réalisation des structures des <i>Airbus A320</i> et <i>A350</i> (données <i>Airbus Group</i>).	9
1.3	Classement des comportements de pièces flexibles [Abenhaim <i>et al.</i> , 2012b].	11
1.4	Scénario classique d’assemblage de deux plaques (outillage non représenté).	12
1.5	Schéma de principe du processus d’assemblage classique d’un sous-ensemble (outillage non représenté).	13
1.6	Atelier d’assemblage de la pointe avant d’un <i>Airbus A380</i> (images <i>Aerolia</i>).	14
1.7	Outillage permettant de conformer un panneau (à gauche), et panneau monté sur un outillage réglable (à droite) (images <i>Aerolia</i>).	14
1.8	Opérations d’assemblage et de perçage (images <i>Aerolia</i>).	14
1.9	Processus de tolérancement [Chavanne, 2012].	17
1.10	Processus de réalisation d’un produit.	19
1.11	Validation expérimentale du modèle de <i>chaîne de cotes</i> [Radouani, 2003].	20
1.12	Assemblage expérimental [Moriere, 2010].	21
1.13	Démarche de validation expérimentale suivie par [Lê, 2013], et comparaison des domaines jeux évalués par la mesure et par la simulation.	22
1.14	Notion de <i>surface convexe des différences</i> [Adragna <i>et al.</i> , 2010]	22
1.15	Influence de la prise en compte des défauts de forme dans les liaisons [Samper <i>et al.</i> , 2009].	23
1.16	Simulation d’assemblage [Grandjean, 2013].	23
1.17	Support expérimental de validation d’assemblage [Grandjean, 2013].	23
1.18	Assemblage expérimental [Saadat <i>et al.</i> , 2007].	24
1.19	Schéma de principe du processus d’assemblage d’un sous-ensemble envisagé dans le cadre du projet européen LOCOMACHS (outillage non représenté).	25
2.1	Illustration du principe de <i>KC flowdown</i> [Thornton, 1999].	31
2.2	Notion de <i>caractéristique géométrique</i> issue du langage <i>GeoSpelling</i> [Ballu, 2009a].	32
2.3	Opérations qui permettent l’identification des éléments géométriques [Ballu, 2009a].	32
2.4	Notions de <i>jeu</i> et de <i>gap</i> [Anselmetti et Mawussi, 2003].	33
2.5	Notion de <i>débattement</i> [Thiébaud, 2001].	33
2.6	Classification des accostages [Samper, 2007].	34
2.7	Illustration de différents <i>états géométriques</i> d’un même composant flexible.	35
2.8	Modélisation des écarts de liaison et de situation des éléments géométriques des composants [Thiébaud, 2001].	36
2.9	Notion de <i>Matrice de sensibilité</i> illustrée par [Andolfatto, 2013].	36
2.10	Assemblage théorique 2D de deux composants.	37
2.11	<i>Graphe Orienté de Contact</i> de l’assemblage représenté en Figure 2.10.	37

2.12	Illustration du modèle nominal <i>CAO</i> , d'un <i>Skin model</i> continu et d'un <i>Skin model shape</i> discret [Anwer <i>et al.</i> , 2013].	39
2.13	Processus d'assemblage envisagé [LOCOMACHS, 2012].	43
2.14	Processus de validation de la simulation d'assemblage [LOCOMACHS, 2012].	44
2.15	Exemple de structure aéronautique.	47
2.16	Evolution de la représentation des éléments géométriques au cours du processus de simulation.	49
2.17	Composition des différents champs d'écarts mentionnés au niveau d'un composant souple.	51
2.18	Composition des différents champs d'écarts mentionnés au niveau d'un assemblage de composants souples.	51
2.19	Evolution de la représentation des éléments géométriques au cours du processus de validation par la mesure des résultats de la simulation.	52
2.20	Champs d'écarts représentatifs du jeu.	53
2.21	Illustration du problème de compatibilité des géométries discrètes sur la représentation du jeu par un champ d'écarts discret.	54
2.22	Représentation du même jeu à l'aide d'un champ d'écarts et d'une représentation surfacique.	54
3.1	Variation de la géométrie réelle d'un composant en fonction de sa configuration.	60
3.2	Schémas de mise en position.	61
3.3	Support expérimental permettant de faire varier le nombre et la position des appuis [Abenhaim <i>et al.</i> , 2012a].	61
3.4	Support de mesure dédié [Ascione et Polini, 2010].	62
3.5	Classification des principales méthodes de contrôle des pièces flexibles [Abenhaim, 2009].	63
3.6	Procédure permettant d'évaluer des défauts géométriques locaux sur un nuage de points de mesure [Aidibe <i>et al.</i> , 2012].	66
3.7	Segmentation d'un corps de pompe [Zhao, 2010].	67
3.8	Principe exposé par [Blaedel <i>et al.</i> , 2002].	68
3.9	Résultats obtenus par [Blaedel <i>et al.</i> , 2002]. A gauche : mesure sous chargement. Au centre : mesure avant chargement. A droite : résultat de simulation sous chargement.	69
3.10	Nuage de points de mesure et maillage <i>Eléments Finis</i> associé, et résultats de simulation [Weckenmann et Weickmann, 2006].	69
3.11	Principe de recherche de correspondances entre deux géométries d'une même pièce dans deux configurations différentes [Radvar-Esfahlan et Tahan, 2012].	70
3.12	Résultats de simulation de la géométrie assemblée [Gentilini et Shimada, 2011].	71
3.13	Résultat de l'analyse fréquentielle [Denkena <i>et al.</i> , 2002].	72
3.14	Processus de décomposition modale appliqué sur un piston [Samper, 2007].	73
3.15	Géométries caractéristiques d'un composant flexible d'après [Lartigue <i>et al.</i> , 2006].	77
3.16	Système de mesure utilisé.	84
3.17	Principe de triangulation et ligne <i>LASER</i> émise par le capteur.	85
3.18	Montage modulaire permettant de placer les plaques dans leur configuration de mesure.	86
3.19	Acquisition simultanée de la géométrie de la plaque et des efforts au niveau des appuis.	87
3.20	Configuration isostatique de mesure de la plaque mono-courbure.	87
3.21	Trajectoire de numérisation de la géométrie de la forme réelle de la pièce.	88
3.22	Nuage de points obtenu par la mesure (environ 2.5 millions de points). Nuage de points recalé par rapport au maillage de référence (représentation de 1 point sur 2000).	88
3.23	Illustration des différentes étapes de la méthode de filtrage.	89
3.24	Géométries construites à partir des champs d'écarts partiel et champ d'écarts extrapolé évalués (écarts en mm, amplitude facteur 10).	90
3.25	Cartographie du bruit de mesure évalué lors du filtrage (écarts-types en mm).	91
3.26	Résultats de la décomposition modale. De haut en bas : contribution de chaque mode, nombre de points hors tolérance après recombinaison modale avec n modes et résidu associé.	92

3.27	Ecarts résiduels entre le champ d'écarts initial et le champ d'écarts reconstruit à l'aide des modes (écarts en mm, amplitude facteur 100).	93
3.28	Géométrie représentative de la déformée simulée correspondant à la configuration de mesure (écarts en mm, amplitude facteur 50).	96
3.29	Géométrie à l'état libre obtenue par la méthode de compensation des effets de l'environnement par la simulation (écarts en mm, amplitude facteur 10).	96
4.1	Systèmes de mesure de jeux utilisés dans l'industrie aéronautique, <i>Gapman</i> [Capacitec, 2015] et <i>Gapgun</i> [Third-Dimension, 2015].	102
4.2	Système de mesure de jeux <i>gonflable</i> , avec capteurs inductifs [Buttrick, 2014].	103
4.3	Prise d'empreinte à l'aide d'un composé polymère (<i>Plastiform</i>).	103
4.4	Principe de la tomographie industrielle et application à la vérification de la position de composants à l'intérieur d'un assemblage [Thiery, 2013].	104
4.5	Illustration de la méthode de mesure à l'aide d'un jeu de cales d'épaisseur.	107
4.6	Illustration de la méthode de mesure par prise d'empreinte directe, démoulage, puis mesure de l'empreinte.	108
4.7	Illustration de la méthode de mesure par prise d'empreinte directe puis mesure de l'empreinte sur l'un des composants.	109
4.8	Illustration de la méthode de mesure indirecte par différence.	110
4.9	Assemblage bi-composant rigide étudié.	112
4.10	Illustrations des <i>liaisons</i> et des <i>éléments géométriques de référence</i>	112
4.11	Processus de simulation de jeu à partir des données de mesure réalisées sur les composants [Lacroix <i>et al.</i> , 2015].	113
4.12	Etape d'intégration des données de mesure au niveau des maillages [Lacroix <i>et al.</i> , 2015].	114
4.13	Acquisition des éléments de référence du <i>couvercle</i> (à gauche) et de la surface à l'interface jeu du <i>socle</i> (à droite).	114
4.14	Construction du <i>repère de mesure</i> $\mathcal{R}_{mesure}^{couvercle}$ associé au <i>couvercle</i> (à gauche) et expression des données de mesure dans le <i>repère théorique</i> $\mathcal{R}_{théorique}^{couvercle}$ (à droite).	115
4.15	Illustration de la procédure de filtrage mise en œuvre sur le <i>socle</i>	116
4.16	Groupes de noeuds représentés dans le <i>repère du système de mesure</i> (à gauche) et dans le <i>repère d'assemblage</i> (à droite).	117
4.17	Maillage déformé <i>.stl</i> de la surface à l'interface jeu du <i>socle</i> (à gauche) et cale <i>.stl</i> construite sur mesure à partir des maillages déformés des deux faces exprimés dans le <i>repère de l'assemblage</i> (à droite).	117
4.18	Réalisation de la cale sur mesure par <i>impression 3D</i> et assemblage final.	117
4.19	Processus de validation de la simulation d'assemblage de composants flexibles.	118
4.20	Confrontations envisageables entre les résultats de simulation de jeu et l'assemblage réel [Lacroix <i>et al.</i> , 2015].	119
5.1	Sous-ensemble de structure aéronautique (démonstrateur <i>LAWiB</i>) [LOCOMACHS, 2012].	124
5.2	Support expérimental de validation des travaux de thèse.	126
5.3	Géométrie simplifiée du support expérimental.	127
5.4	Géométrie discrétisée du support expérimental.	128
5.5	Scénario d'assemblage mis en œuvre sur le support expérimental.	129
5.6	Séquence d'assemblage mise en œuvre expérimentalement sur le support expérimental (phases n°1 et n°2).	130
5.7	<i>Graphe Orienté de Contact</i> du support expérimental.	130
5.8	Détail des éléments géométriques du <i>couvercle</i>	131
5.9	Détail des éléments géométriques de l' <i>ensemble support</i>	131
5.10	Séquence d'assemblage intégrant les différentes opérations de mesure et de simulation (phases n°1 et n°2).	131

5.11	Configuration de mesure $G_1_34_D_18$	133
5.12	Cartographie du bruit de mesure évalué lors du filtrage (écarts-type en mm).	133
5.13	Géométrie partielle et géométrie extrapolée évaluées par la mesure (en haut), déformée simulée et géométrie à l'état libre évaluée (en bas), pour la configuration (18) $G_1_34_D_18$, exprimées dans le repère $\mathcal{R}_{commun} (théorique)$ (écarts en mm, amplitude facteur 1).	134
5.14	Géométrie partielle et géométrie extrapolée évaluées par la mesure (en haut), déformée simulée et géométrie à l'état libre évaluée (en bas), pour la configuration (12) $G_1_34_D_12$, exprimées dans le repère $\mathcal{R}_{commun} (théorique)$ (écarts en mm, amplitude facteur 1).	134
5.15	Différence entre les deux <i>géométries contraintes mesurées</i> (à gauche) et les deux <i>déformées simulées</i> (à droite), exprimées dans le repère $\mathcal{R}_{commun} (théorique)$ (écarts en mm, amplitude facteur 1).	137
5.16	Ecarts entre la variation de la <i>géométrie contrainte mesurée</i> et la variation de la <i>déformée simulée</i> entre les configurations $G_1_34_D_18$ (18) et $G_1_34_D_12$ (12), exprimées dans le repère $\mathcal{R}_{commun} (théorique)$ (écarts en mm, amplitude facteur 10).	137
5.17	Champs d'écarts impliqués dans une évaluation de la <i>géométrie à l'état libre</i> par retournement.	139
5.18	Approximation réalisée pour l'évaluation de la <i>géométrie à l'état libre</i> par retournement.	139
5.19	Illustration du principe de retournement sur une plaque.	140
5.20	<i>Géométries contraintes</i> mesurées (faces inférieures et supérieures en haut), et <i>géométrie à l'état libre</i> obtenue par la demi-somme (en bas), pour le retournement (<i>ret18</i>) (écarts en mm, amplitude facteur 1).	140
5.21	<i>Géométries contraintes</i> mesurées (faces inférieures et supérieures en haut), et <i>géométrie à l'état libre</i> obtenue par la demi-somme (en bas), pour le retournement (<i>ret12</i>) (écarts en mm, amplitude facteur 1).	141
5.22	Variation observée entre les deux <i>géométries à l'état libre</i> évaluées par retournement (écarts en mm, amplitude facteur 100).	141
5.23	Ecarts évalués, pour les configurations $G_1_34_D_12$ (12) et $G_1_34_D_18$ (18), entre la <i>géométrie à l'état libre</i> obtenue par retournement et la <i>géométrie à l'état libre</i> obtenue par mesure et par compensation des effets de l'environnement à l'aide de la simulation de référence (écarts en mm, amplitude facteur 10).	142
5.24	<i>Géométries contraintes</i> mesurées correspondant aux champs d'écarts moyens évalués (partiel et complet).	145
5.25	Etendues et écart-types de la dispersion des amplitudes des champs d'écarts (partiels et complets), $i \in \{1; 15\}$	146
5.26	Evolution au cours du temps de la <i>géométrie contrainte</i> mesurée correspondant aux champs d'écarts évalués (partiels et complets) par rapport à la première évaluation ($i = 1$ référence), dans une section donnée (ici section $y = 375mm$). Il y a environ 18min entre deux mesures consécutives.	147
5.27	Evolution au cours du temps de la <i>géométrie contrainte</i> mesurée correspondant aux champs d'écarts partiels évalués, dans une section donnée lorsque la pièce a été bridée (ici section $y = 325mm$). Il y a environ 1min entre deux mesures consécutives.	148
5.28	Marches étalons utilisées pour analyser la variation de mesure au cours du temps. Représentation de la ligne LASER au niveau de la caméra CCD du capteur.	149
5.29	Variations de l'altitude mesurée des deux marches au cours du temps.	150
5.30	Etendues et écart-types de la dispersion des amplitudes des champs d'écarts (partiels et complets) lorsque les paramètres de recalage rigide varient, $i \in \{1; 15\}$	151
5.31	Eléments géométriques impliqués dans l'approximation réalisée.	152
5.32	Evolution de l'approximation réalisée (h en mm) en fonction du rayon du cylindre qui permet le filtrage ($\frac{C}{2}$ en mm), pour un rayon de courbure $R = 9433mm$	152
5.33	Géométries des <i>déformées</i> simulées correspondant aux configurations $G_1_34_D_12$ (12) et $G_1_34_D_18$ (18), avec les paramètres par défaut (écarts en mm).	153
5.34	Géométries des <i>déformées</i> simulées correspondant aux configurations $G_1_34_D_12$ (12) et $G_1_34_D_18$ (18), sans simplification de la géométrie (écarts en mm).	153
5.35	Géométries des <i>déformées</i> simulées correspondant aux configurations $G_1_34_D_12$ (12) et $G_1_34_D_18$ (18), sans idéalisation de la géométrie (écarts en mm). Ecarts aux simulations de référence correspondantes (écarts en mm, amplitude facteur 10).	155

5.36	Géométries des <i>déformées</i> simulées correspondant aux configurations <i>G_1_34_D_12</i> (12) et <i>G_1_34_D_18</i> (18), avec une épaisseur de 1.5mm + 0.01 (écarts en mm). Ecarts aux simulations de référence correspondantes (écarts en mm, amplitude facteur 10).	155
5.37	Géométries des <i>déformées</i> simulées correspondant aux configurations <i>G_1_34_D_12</i> (12) et <i>G_1_34_D_18</i> (18), avec une masse ponctuelle de 10g appliquée en <i>D_34</i> (écarts en mm). Ecarts aux simulations de référence correspondantes (écarts en mm, amplitude facteur 10).	156
5.38	Géométries des <i>déformées</i> simulées correspondant aux configurations <i>G_1_34_D_12</i> (12) et <i>G_1_34_D_18</i> (18), avec une masse ponctuelle de 10g appliquée en <i>C_1</i> (écarts en mm). Ecarts aux simulations de référence correspondantes (écarts en mm, amplitude facteur 10).	156
5.39	Configurations de <i>recalage de modèle</i> étudiées, à partir de la configuration <i>G_1_34_D_18</i> (18), avec application de masses respectivement en <i>D_34</i> et <i>G_20</i>	157
5.40	Modes de variation de la déformée simulée normés correspondant aux configurations de mesure <i>G_1_34_D_12</i> (12) et <i>G_1_34_D_18</i> (18). Modes correspondant à une variation du module d'Young (<i>a</i>), de la masse volumique (<i>b</i>), de l'épaisseur (<i>c</i>), de la position de l'appui <i>D_i</i> (<i>i</i> = 12 ou 18) suivant la direction <i>Y</i> (<i>d</i>) (écarts en mm, amplitude facteur 20).	159
5.41	Contributions observées pour chacun des modes normés liés à un paramètre, pour les configurations <i>G_1_34_D_12</i> (12) (en bleu) et <i>G_1_34_D_18</i> (18) (en rouge).	160
5.42	Contributions observées pour chacun des modes non normés liés à un paramètre, pour les configurations <i>G_1_34_D_12</i> (12) (en bleu) et <i>G_1_34_D_18</i> (18) (en rouge).	160
5.43	Eléments nécessaires à la définition du modèle permettant la simulation d'assemblage dans l'environnement <i>AnaTolFlex</i>	164
5.44	Représentation des liaisons entre les éléments géométriques des composants, par l'intermédiaire des <i>spiders</i> , dans l'environnement <i>AnaTolFlex</i> (liaisons d'attachement non représentées).	165
5.45	Représentation des maillages de contact, illustrés sur les maillages avec défauts géométriques, dans l'environnement <i>AnaTolFlex</i>	165
5.46	Géométries correspondant à l'assemblage simulé de la phase de mise en position du couvercle sur l'ensemble support (phase n°1) (écarts en mm, amplitude facteur 10).	167
5.47	Géométries correspondant à l'assemblage simulé de la phase de pré-assemblage du couvercle sur l'ensemble support (phase n°2) (écarts en mm, amplitude facteur 10).	167
5.48	Géométries correspondant aux jeux simulés lors de la phase de mise en position du couvercle sur l'ensemble support (phase n°1) (écarts en mm, amplitude facteur 10).	168
5.49	Géométries correspondant aux jeux simulés lors de la phase de pré-assemblage du couvercle sur l'ensemble support (phase n°2) (écarts en mm, amplitude facteur 10).	168
5.50	Ensemble support seul avant assemblage.	171
5.51	Couvercle mis en position sur l'ensemble support (phase n°1)	171
5.52	Couvercle pré-assemblé sur l'ensemble support (phase n°2)	171
5.53	Séquence d'assemblage pour la validation, intégrant les opérations de mesure de jeu par prise d'empreinte (phases n°1 et n°2).	172
5.54	Illustration de la méthode de mesure par prise d'empreinte directe puis mesure de l'empreinte sur l'un des composants.	173
5.55	Mesure de l'ensemble support avant l'assemblage et mesure des empreintes sur l'ensemble support après démontage du couvercle (illustré pour la phase n°1).	173
5.56	Illustration de la méthode de prise d'empreinte.	173
5.57	Séquence d'assemblage pour la validation, intégrant les opérations de mesure de jeu par différence (phases n°1 et n°2).	175
5.58	Illustration de la méthode de mesure indirecte par différence.	175
5.59	Mesure de l'ensemble support avant l'assemblage et mesure du couvercle assemblé (illustré pour la phase n°1).	175
5.60	Géométries correspondant à la mesure de l'assemblage en phase de mise en position du couvercle sur l'ensemble support (phase n°1) (écarts en mm, amplitude facteur 10).	177
5.61	Géométries correspondant à la mesure de l'assemblage en phase de pré-assemblage du couvercle sur l'ensemble support (phase n°2) (écarts en mm, amplitude facteur 10).	177
5.62	Géométries correspondant aux jeux mesurés lors de la phase de mise en position du couvercle sur l'ensemble support (phase n°1) (écarts en mm, amplitude facteur 10).	178

5.63	Géométries correspondant aux jeux mesurés lors de la phase de pré-assemblage du <i>couvercle</i> sur l' <i>ensemble support</i> (phase n°2) (écarts en mm, amplitude facteur 10).	178
5.64	Différences des jeux simulés et mesurés lors de la phase de mise en position du <i>couvercle</i> sur l' <i>ensemble support</i> (phase n°1) (écarts en mm, amplitude facteur 10).	180
5.65	Différences des jeux simulés et mesurés lors de la phase de pré-assemblage du <i>couvercle</i> sur l' <i>ensemble support</i> (phase n°2) (écarts en mm, amplitude facteur 10).	180
A.1	Diagramme de causes et effets concernant l'acquisition.	III
A.2	Diagramme de causes et effets concernant le traitement des données de mesure.	IV
A.3	Diagrammes de causes et effets limités aux paramètres jugés les plus influents.	V
C.1	Nomenclature des composants du support expérimental.	XV
D.1	Résultats de bruit et de justesse évalués par [Audfray, 2012] pour l'ensemble <i>MMT</i> et capteur <i>LASER</i> plan.	XIX
E.1	Evolution au cours du temps de la <i>géométrie contrainte</i> mesurée correspondant aux champs d'écarts évalués (partiels et complets) par rapport à la première évaluation ($i = 1$ référence), dans une section donnée (ici section $y = 200mm$). Il y a environ $18min$ entre deux mesures consécutives.	XXIII
E.2	Evolution au cours du temps de la <i>géométrie contrainte</i> mesurée correspondant aux champs d'écarts évalués (partiels et complets) par rapport à la première évaluation ($i = 1$ référence), dans une section donnée (ici section $y = 500mm$). Il y a environ $18min$ entre deux mesures consécutives.	XXIV
E.3	Evolution au cours du temps de la <i>géométrie contrainte</i> mesurée correspondant aux champs d'écarts évalués (partiels et complets) par rapport à la première évaluation ($i = 1$ référence), dans une section donnée (ici section $x = -25mm$). Il y a environ $18min$ entre deux mesures consécutives.	XXV

Liste des tableaux

1.1	Tableau comparatif des matériaux (à rigidité équivalente) (données <i>The Increasing Use of Aluminium, 1996</i> , rapport technique pour la <i>Commission Européenne</i>).	10
1.2	Tableau comparatif des matériaux (avantages et inconvénients principaux) (données <i>France-Métallurgie</i>).	10
1.3	Classification des méthodes d'analyse et de synthèse des tolérances [Hassani <i>et al.</i> , 2009]. . .	18
1.4	Synthèse concernant l'état de l'art de la validation de simulations d'assemblage.	24
2.1	Synthèse des représentations des géométries manipulées.	46
2.2	Caractéristiques des éléments géométriques intervenant dans une liaison type.	48
4.1	Evaluation qualitative de la mesure de jeu à l'aide de cales d'épaisseur.	107
4.2	Evaluation qualitative de la mesure de jeu par prise d'empreinte directe, démoulage, puis mesure de l'empreinte.	108
4.3	Evaluation qualitative de la mesure de jeu par prise d'empreinte directe puis mesure de l'empreinte sur l'un des composants.	109
4.4	Evaluation qualitative de la mesure de jeu par mesure indirecte par différence.	110
4.5	Tableau récapitulatif des performances de chacune des méthodes.	111
5.1	Tableau résumant les corrections apportées sur les paramètres étudiés.	161
B.1	Séquence d'assemblage du démonstrateur <i>LAWiB</i>	XII
C.1	Nomenclature des composants du support expérimental.	XVI
D.1	Données qualifiées pour l'ensemble <i>MMT</i> et capteur <i>LASER</i> plan [Audfray, 2012].	XX

Introduction

Contexte industriel et problématique scientifique

La consommation de carburant est actuellement une préoccupation majeure dans le domaine de l'aéronautique. Les concepteurs ont tendance à concevoir des structures de plus en plus légères afin de réduire les coûts liés au carburant. De nouvelles technologies ont ainsi été mises en œuvre afin de satisfaire cette contrainte. L'émergence des matériaux composites notamment a permis de concevoir et de réaliser des structures plus légères que les structures métalliques classiques, tout en garantissant des performances mécaniques équivalentes.

Cependant l'emploi de ces matériaux composites nécessite un soin tout particulier lors des opérations d'assemblage des composants de structure. En effet, de nouvelles exigences sont à prendre en compte. Contrairement aux matériaux métalliques, les matériaux composites supportent mal les contraintes de cisaillement, qui ont tendance à entraîner un délaminage de leurs plis. Pour garantir l'intégrité du matériau composite une fois assemblé, il est ainsi nécessaire de limiter les contraintes internes installées dans la structure lors de l'assemblage des composants. Concrètement cela se traduit par une limitation des jeux admissibles aux interfaces entre les composants, afin que les efforts d'assemblage requis pour fermer ces jeux ne dépassent pas un certain seuil. La valeur de ces jeux est déterminée lorsque les composants sont en configuration de pré-assemblage, avant la pose des éléments de fixation.

Très souvent ces jeux aux interfaces entre les composants n'existent pas nominale et les assemblages se font parfaitement. Cependant les composants réels présentent des défauts géométriques à l'issue de l'étape de fabrication. De plus les composants assemblés étant de grande dimension, élancés et d'épaisseur réduite, ceci leur confère une certaine souplesse, qui engendre des déformations élastiques qui peuvent être relativement importantes. Ainsi des jeux aux interfaces entre les composants apparaissent lors de l'étape d'assemblage.

Des outillages réglables permettent d'ajuster la configuration des composants au niveau du poste de pré-assemblage afin de réduire ces jeux. Mais du fait du grand nombre de composants à assembler, et donc d'interfaces, il est difficile de respecter pour chaque interface la valeur de jeu admissible. Il est alors nécessaire de recourir à une opération de calage entre les composants avant l'assemblage final. De nombreuses techniques, utilisées couramment dans l'industrie, permettent de réaliser physiquement ce calage entre les composants. Cependant les coûts liés à cette opération de calage, sous sa forme actuelle, sont considérés comme trop importants.

En effet, l'opération de calage requiert au préalable une évaluation des jeux à combler, effectuée par mesure directe. Elle nécessite ainsi un pré-assemblage des composants afin de les placer dans leur configuration d'assemblage. Les jeux sont ensuite mesurés, la plupart du temps manuellement. Cette opération est relativement longue et fastidieuse, et du fait du grand nombre d'interfaces entre les composants, les temps d'immobilisation des composants sur le poste de pré-assemblage sont très importants. Il reste ensuite à démonter les composants avant de les assembler de manière définitive avec les cales réalisées sur mesure. Ainsi la succession de ces opérations de pré-assemblage / mesure des jeux / désassemblage est considérée comme

non-productive.

Les coûts liés aux opérations d'assemblage d'un avion représentent environ le tiers de sa valeur, ce résultat étant principalement dû à la durée de la phase d'assemblage. Les acteurs européens majeurs du domaine aéronautique, regroupés en *Figure 1*, se sont ainsi réunis au sein du projet européen *LOCOMACHS* (pour "*LOW COst Manufacturing and Assembly of Composite and Hybrid Structures*") [LOCOMACHS, 2012], avec pour but l'amélioration des opérations d'assemblage notamment. L'objectif global étant la réduction significative ou la suppression des opérations non-productives ou les plus coûteuses, que ce soit en phase de conception, de fabrication ou d'assemblage.



Figure 1 – Partenaires au sein du projet européen LOCOMACHS.

En ce qui concerne les opérations d'assemblage, différentes thématiques sont explorées au sein de ce projet : l'optimisation et l'automatisation de certaines opérations réalisées au cours de l'assemblage, l'amélioration et le développement de nouveaux outils d'assemblage ou encore l'intégration de ces nouvelles technologies au sein du processus d'assemblage.

Concernant plus particulièrement l'opération de calage, les attentes majeures se situent au niveau :

- ✈ Des techniques de mesure de jeu.
- ✈ Du procédé de fabrication des cales.
- ✈ De la prédiction des écarts géométriques.

Les travaux de recherche qui font l'objet de ce manuscrit de thèse s'inscrivent principalement dans ce troisième item, concernant la prédiction des écarts géométriques. Il est en effet envisagé de remplacer l'étape de mesure de jeu sur poste de pré-assemblage, considérée comme non-productive, par une étape de simulation de jeu. Cette étape de prédiction se décomposerait en deux opérations principales : la mesure de caractéristiques sur les composants seuls (c'est-à-dire hors poste de pré-assemblage), puis la simulation de l'état géométrique des composants virtuellement pré-assemblés (à partir des mesures réalisées précédemment et de modèles de comportement des composants et de l'assemblage).

Des outils de simulation d'assemblage performants, permettant de prendre en compte la souplesse des composants, leurs variations géométriques, la nature composite des matériaux, le frottement ou encore le contact unilatéral entre composants, ont également été développés dans le cadre de ce projet. Afin de valider les performances de ces outils, une confrontation des résultats de simulation à un assemblage réel est nécessaire.

Les travaux de thèse se focalisent ainsi sur le lien entre les grandeurs caractéristiques des composants et de l'assemblage, et sur la détermination de celles-ci en vue de la simulation des écarts géométriques lors de l'assemblage (détermination de caractéristiques composants et simulation d'assemblage) et de la validation de cette simulation (détermination de caractéristiques d'assemblage et confrontation des résultats). Du fait du contexte industriel, le jeu entre les composants pré-assemblés est considéré comme la caractéristique d'assemblage principale dans cette étude.

Articulation du manuscrit

L'objectif principal des travaux de thèse présentés dans ce manuscrit est la définition d'une méthode permettant la validation expérimentale de simulation d'assemblage de composants souples. Cette méthode doit permettre d'une part l'évaluation de caractéristiques géométriques et mécaniques sur des composants isolés, et d'autre part l'évaluation de caractéristiques géométriques au niveau du produit assemblé.

Le *Chapitre 1* présente de manière générale le processus d'assemblage de structure aéronautique. Les caractéristiques des assemblages de ce type sont présentées afin de délimiter le contexte de l'étude réalisée. Le processus industriel d'assemblage est illustré sur des exemples simples, afin de montrer ses limites actuelles dans le contexte industriel. Les outils et méthodes qui permettent actuellement l'assistance en phase de conception des produits et en phase d'assemblage sont présentés. Cela permet de positionner les travaux de thèse dans le contexte de la validation expérimentale de simulations d'assemblage, ainsi que dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*, et de faire émerger la problématique de l'anticipation de l'état géométrique d'un assemblage de composants flexibles à partir de l'évaluation par la mesure de caractéristiques géométriques et mécaniques de ces composants avant leur assemblage.

La première étape, qui constitue le *Chapitre 2*, consiste ainsi à déterminer quelles sont les caractéristiques clés d'un assemblage flexible, et comment faire le lien entre celles-ci et les caractéristiques des composants. Il s'agit alors d'identifier les différents écarts géométriques liés aux composants, aux liaisons et aux déformées des composants. L'étude est réalisée dans le contexte de la validation de simulation d'assemblage flexible par la mesure, ce qui amène à considérer les environnements de la conception, de la simulation et de la mesure. Un outil de représentation, adapté au contexte, est choisi afin de représenter les écarts géométriques tout au long du processus de validation.

Une fois les caractéristiques des composants déterminées, il est nécessaire de les évaluer par la mesure. Le *Chapitre 3* présente ainsi un état de l'art de la métrologie des composants souples, qui permet notamment de mettre en avant des méthodes de mesure et de compensation des effets de l'environnement par la simulation. La méthode retenue pour l'évaluation de caractéristiques sur des composants souples est exposée, ainsi que les hypothèses sur lesquelles elle repose. Elle est détaillée sur un exemple relativement simple afin d'illustrer les notions qui sont abordées. Elle permet d'obtenir une représentation de la géométrie d'une forme réelle à l'état libre, par mesure d'un composant dans une configuration particulière, et par compensation des effets de l'environnement sur celui-ci. La simulation d'assemblage est réalisée à partir de ces données de mesure.

Afin de confronter les résultats de simulation au réel, il est nécessaire de définir une méthode d'évaluation de caractéristiques sur le produit assemblé. La problématique industrielle du calage étant une préoccupation majeure dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*, le *Chapitre 4* présente un état de l'art des

méthodes d'évaluation de jeu par la mesure. Celui-ci permet de mettre en avant les difficultés que représente cette évaluation. Différentes méthodes sont alors étudiées et classées, afin de déterminer celles qui permettront la validation expérimentale de la simulation d'assemblage flexible par mesure de jeu. Les processus d'évaluation de jeu par la simulation en rigide et en flexible sont détaillés, afin d'illustrer les différentes notions.

Le *Chapitre 5* présente la procédure de validation expérimentale de simulation d'assemblage de composants souples. Un support expérimental, qui se veut représentatif des problématiques industrielles, a été conçu dans ce but précis. La procédure d'évaluation de caractéristiques sur composant souple détaillée dans le *Chapitre 3* est appliquée, puis validée à l'aide de différentes méthodes. Une analyse de sensibilité est conduite afin d'une part de définir le cadre de mise en œuvre de cette méthode, et d'autre part de corriger les paramètres du modèle utilisé afin d'améliorer les résultats obtenus. La simulation d'assemblage est réalisée, à partir de ce résultat d'évaluation par la mesure, dans le cadre d'un scénario prédéfini. Les méthodes retenues au *Chapitre 4* sont mises en œuvre sur l'assemblage réel, et permettent d'évaluer le jeu par la mesure. La confrontation des résultats de jeu mesuré et simulé permet de conclure notamment quant aux performances de l'outil de simulation d'assemblage utilisé.

Chapitre **1**

Processus d'assemblage de structures aéronautiques

Sommaire

1	Introduction	7
2	Assemblages de structures aéronautiques	7
2.1	Géométries typiques	8
2.2	Matériaux typiques	9
2.3	Contexte de l'étude	10
3	Processus industriel d'assemblage aéronautique	12
3.1	Description du processus	12
3.2	Outils et technologies spécifiques	15
3.3	Limites actuelles	15
4	Tolérancement et assistance à l'assemblage	16
4.1	Méthodes et outils de tolérancement	17
4.2	Assistance à l'assemblage par la mesure	18
5	Positionnement des travaux	19
5.1	Validation expérimentale de simulations d'assemblage	20
5.2	Contexte du projet européen <i>LOCOMACHS</i>	25
5.3	Contexte des travaux de thèse	26

1 Introduction

Le processus d'assemblage regroupe l'ensemble des activités qui permettent de passer de l'état de composant à l'état de produit assemblé. On peut ainsi évoquer les activités d'assemblage définitif proprement dit, qui consistent en la pose de rivets, de boulons ou de colle au niveau des interfaces entre les composants à assembler. Elles sont cependant en aval d'un processus bien plus complexe, qui comprend également des activités de mise en position et maintien des composants sur les outillages, de perçage, de mesure, de calage, de nettoyage, de peinture, de pré-assemblage, ... L'ordonnancement de ces activités au sein du processus d'assemblage et la gestion des ressources, dans l'optique du respect des exigences au niveau du produit assemblé, constituent la gamme d'assemblage du produit.

Parmi toutes les opérations qui constituent la gamme d'assemblage, certaines sont considérées comme non-productives et coûteuses en temps. En effet, de nombreuses opérations ne permettent pas une automatisation, du fait notamment des grandes dimensions des pièces, de la nature composite des matériaux et du recours non-systématique à ces opérations. Des opérations de mesure de jeu, par exemple, sont parfois nécessaires à l'état-pré-assemblé. Elles sont alors réalisées manuellement par les opérateurs, ce qui conduit à des temps d'immobilisation des structures très importants (de l'ordre de la semaine pour l'assemblage de la peau d'une aile sur sa structure). Sans parler des problèmes liés à la répétabilité de mesure.

L'objectif de ce chapitre est de mettre en avant les problématiques liées à l'émergence des matériaux composites dans le domaine de l'aéronautique. En effet, le processus industriel d'assemblage a dû s'adapter à l'utilisation de ces nouveaux matériaux. Malgré des technologies performantes mises en œuvre, certaines opérations sont encore problématiques. Il s'agira ainsi de comprendre quelles sont les limites actuelles au niveau de ces opérations, et quels sont les moyens et méthodes qu'il est nécessaire de mettre en œuvre afin d'améliorer de façon significative leur rendement.

La section 2 fait l'objet d'une description des assemblages de structure aéronautique. Les aspects géométriques et matériaux sont étudiés, ce qui permet de mettre en avant certaines problématiques industrielles et de fixer le contexte de l'étude.

La section 3 décrit de façon plus précise le processus industriel d'assemblage aéronautique. Les opérations classiques d'assemblage, les outils spécifiques et les technologies mis en œuvre sont détaillés. Les limites actuelles de ce processus sont également exposées.

La section 4 traite du tolérancement et de l'assistance à l'assemblage. Les méthodes qui permettent actuellement de gérer les opérations d'assemblage sont décrites.

La section 5 présente les travaux académiques menés dans le cadre de la validation d'assemblage par la mesure. Elle permet également de conclure quant au positionnement des travaux dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*, et dans le cadre de la caractérisation géométrique des assemblages flexibles par la mesure.

2 Assemblages de structures aéronautiques

Les assemblages de structures aéronautiques sont conçus sous une contrainte majeure qui est la minimisation des masses embarquées, tout en garantissant des exigences concernant la tenue en service. Ainsi les géométries des composants sont optimisées, ce qui les rend de plus en plus complexes. Les matériaux choisis sont également de plus en plus performants, et typiques du domaine aéronautique. Géométrie et matériau sont étroitement liés, d'autant plus dans le contexte de composants souples. Cet aspect sera évoqué en synthèse.

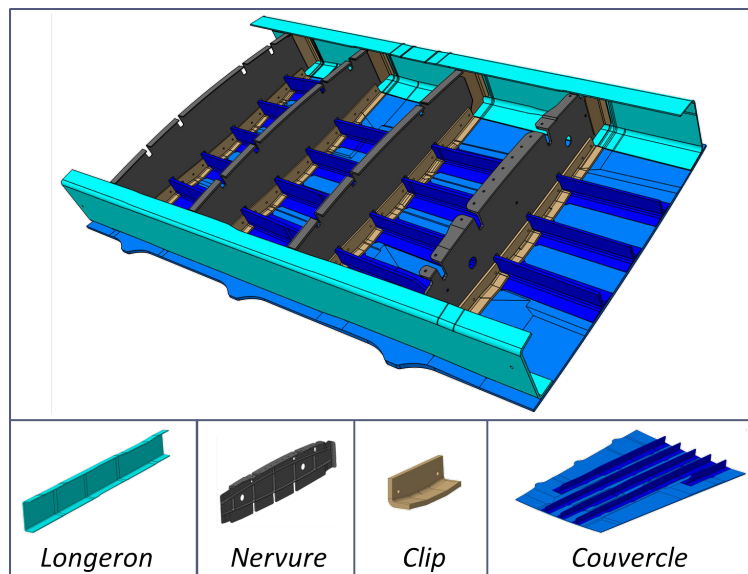


Figure 1.1 – Sous-ensemble de structure aéronautique (démonstrateur *LAWiB*) [LOCOMACHS, 2012].

2.1 Géométries typiques

Concernant l'aspect géométrique des assemblages de structure aéronautique, les caractéristiques principales des composants sont les suivantes :

- ✈ Ils sont de dimension relativement importante (plusieurs mètres pour certains composants), et souvent de forme élancée.
- ✈ Leurs épaisseurs sont relativement faibles au vue des dimensions des composants (quelques millimètres ou centimètres).
- ✈ Ils sont considérés comme flexibles.
- ✈ Ils sont soumis à des défauts géométriques typiques des matériaux utilisés et des procédés de mise en forme.

Il est possible d'observer sur la *Figure 1.1* un sous-ensemble d'assemblage de structure aéronautique. Cet exemple permet d'illustrer les caractéristiques évoquées. Les *ribs* (nervures) et les *spars* (longerons) sont des composants de type poutre qui constituent la structure de l'assemblage. Ce sont des composants généralement peu souples. Les *covers* (couvercles) sont des composants de type plaque qui constituent la peau de la structure. Ce sont des composants beaucoup plus souples. La jonction entre certains composants est assurée par les *clips*.

En ce qui concerne les caractéristiques principales du produit une fois assemblé, on peut citer les éléments suivants :

- ✈ Les liaisons entre les composants sont complètes, c'est-à-dire que l'assemblage définitif ne permet aucune mobilité entre les composants.
- ✈ L'assemblage définitif est fortement hyperstatique, ce qui conduit à un état géométrique final de l'assemblage difficilement maîtrisé.
- ✈ Les liaisons définitives sont principalement réalisées à l'aide de boulons et de rivets.
- ✈ L'assemblage définitif est relativement rigide vis-à-vis de la souplesse des composants seuls, la rigidité de la structure étant donnée par l'assemblage.

Ces caractéristiques géométriques sont vraies quel que soit le matériau utilisé. Toutefois avec l'émergence de nouveaux matériaux, les épaisseurs des composants ont tendance à se réduire. Les procédés de mise en forme associés permettent également aux géométries de se complexifier.

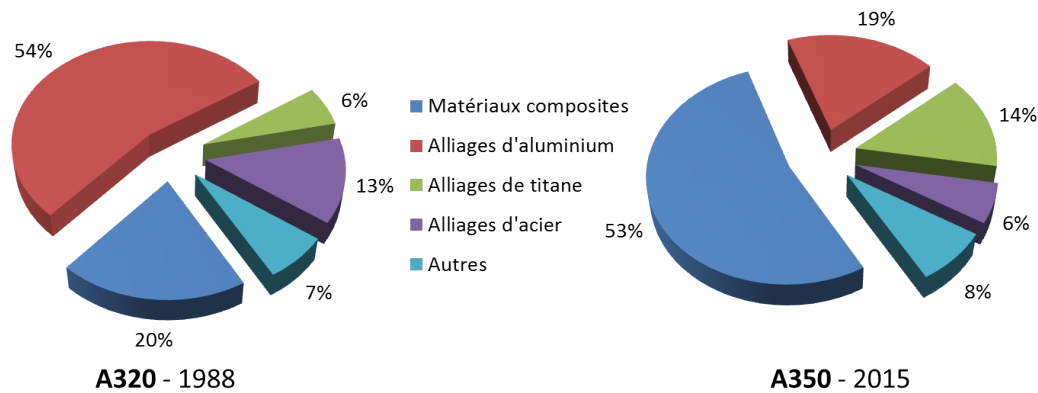


Figure 1.2 – Evolution des matériaux utilisés pour la réalisation des structures des *Airbus A320* et *A350* (données *Airbus Group*).

2.2 Matériaux typiques

Deux grandes familles de matériaux sont utilisées dans l'industrie aéronautique au niveau des éléments de structure, les matériaux métalliques et les matériaux composites. Les matériaux métalliques les plus couramment rencontrés sont les alliages d'aluminium et de titane, tandis que pour les matériaux composites ce sont les fibres de carbone qui prédominent. Depuis plusieurs années, ces dernières ont tendance à prendre une part de plus en plus importante vis-à-vis des alliages d'aluminium. Les alliages de titane restent encore indispensables pour la réalisation des pièces sur lesquelles repose toute la structure de l'avion.

Il est possible d'observer sur la *Figure 1.2* l'évolution des matériaux utilisés pour la réalisation des avions de l'entreprise *Airbus Group*. On observe une forte augmentation de la proportion de matériaux composites, qui devraient ainsi permettre des gains conséquents au niveau de la réduction des masses embarquées. On note également une augmentation de la proportion d'alliages de titane. Les alliages d'acier, et surtout d'aluminium, voient leurs proportions chuter. Ceci illustre clairement le virage technologique emprunté par les industriels de l'aéronautique ces dernières années.

Les matériaux composites sont des matériaux hétérogènes qui sont composés de plusieurs constituants de phases différentes. Ces constituants sont organisés géométriquement afin de conférer à l'ensemble des propriétés mécaniques, généralement anisotropes, supérieures à celles des constituants pris séparément. On peut citer les composites stratifiés (empilement de fibres planes baignés dans une matrice) et les structures sandwich (insertion d'une âme type nid d'abeilles collée entre deux fibres planes). Dans le domaine de l'aéronautique les fibres utilisées sont généralement en carbone, verre ou aramide. Concernant les matrices, elles sont généralement en résine époxy.

On observe dans le *Tableau 1.1* un comparatif des quatre matériaux les plus fréquemment utilisés pour les composants de structure, prenant comme référence l'acier. A rigidité égale (suivant une direction donnée), les épaisseurs nécessaires sont relativement proches. En observant les masses, on constate que les composites à base de fibres de carbone permettent un gain significatif par rapport aux autres matériaux (de l'ordre de 50% à 70%), ce qui justifie le virage technologique amorcé. Cependant on note des coûts importants liés à l'utilisation de ces matériaux, ce qui relativise ce virage d'un point de vue économique.

Dans le *Tableau 1.2* sont listés les principaux avantages et inconvénients liés à l'utilisation de ces différents matériaux. On observe ainsi que l'aluminium a l'avantage d'être peu cher et relativement léger, mais qu'il pose des problèmes de mise en forme et est sensible aux variations de température. Le titane présente des caractéristiques mécaniques bien supérieures aux autres matériaux de l'étude. Cependant son coût important et les difficultés rencontrées lors de la fabrication limitent son emploi aux composants à risque qui

Matériau	Epaisseur	Poids	Coût
Acier	1	1	1
Aluminium	1.44	0.49	1.98
Titane	1.21	0.7	35.9
Composite à base de fibres de carbone	1.05	0.22	6.39

Tableau 1.1 – Tableau comparatif des matériaux (à rigidité équivalente) (données *The Increasing Use of Aluminium, 1996*, rapport technique pour la *Commission Européenne*).

Matériau	Principaux avantages		Principaux inconvénients	
Acier	Coût	Facilité de transformation	Soudabilité	Ductilité
Aluminium	Coût	Légèreté	Mise en forme	Dilatation importante
Titane	Caractéristiques mécaniques	Tenue aux conditions de service	Coût	Difficultés d'usinage
Composite à base de fibres de carbone	Légèreté	Résistance à la corrosion	Coût	Forte anisotropie

Tableau 1.2 – Tableau comparatif des matériaux (avantages et inconvénients principaux) (données *France-Métallurgie*).

subissent des sollicitations très importantes. Le composite à base de fibres de carbone, en plus de sa légèreté, a l'avantage de résister à la corrosion. Son coût reste cependant relativement important. Sa forte anisotropie, qui présente un avantage dans certains cas, devient un désavantage majeur lorsque le composant est soumis à des sollicitations parasites qui peuvent nuire à son intégrité. Enfin, le composite à base de fibres de carbone est à l'heure actuelle peu ou pas recyclée, ce qui pourrait devenir problématique dans quelques années.

2.3 Contexte de l'étude

Pour des raisons économiques évidentes liées à la consommation de carburant, les matériaux composites, à base de fibres de carbone notamment, sont de plus en plus présents dans les assemblages de structure aéronautiques. Toutefois les matériaux métalliques n'ont pas encore disparus. En effet, ils continuent à être utilisés pour la réalisation de composants à risque, là où les performances des matériaux composites ne sont pas encore suffisantes pour garantir l'intégrité des composants. Ainsi la plupart des structures aéronautiques d'aujourd'hui sont dites *hybrides*, car mêlant des matériaux de natures différentes.

L'émergence des matériaux composites a cependant bouleversé le processus de réalisation des avions, de la conception à l'assemblage. En effet, les géométries des composants ont dû évoluer en conséquence, et de nouveaux procédés de réalisation des composants ont vu le jour. Au niveau des opérations d'assemblage, de nouvelles exigences sont apparues, concernant notamment les contraintes admissibles une fois l'assemblage réalisé. Ces exigences sont traduites en exigences géométriques au niveau des jeux maximaux admissibles entre les composants à l'état pré-assemblé. En effet, les états géométrique et mécanique d'un assemblage flexible sont étroitement liés.

Dans cette étude il sera question de composants considérés comme *rigide* ou *flexible*. La frontière entre les deux dépend principalement du point de vue et des hypothèses formulées. La norme [ISO 10579, 2010]

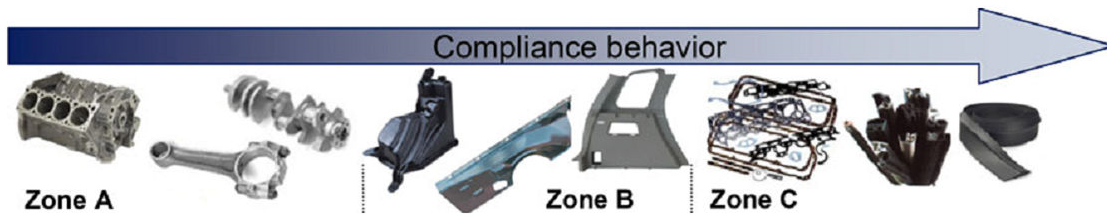


Figure 1.3 – Classement des comportements de pièces flexibles [Abenhaim *et al.*, 2012b].

définit en effet une pièce non-rigide comme une « *pièce qui se déforme d'une valeur telle que, à l'état libre, elle puisse être en dehors des tolérances dimensionnelles et/ou géométriques du dessin* », l'état libre étant défini comme l' « *état d'une pièce soumise uniquement à la force de gravitation* ».

De manière plus concrète, [Abenhaim *et al.*, 2012b] propose un classement des composants souples en trois catégories, visible sur la *Figure 1.3*. On peut observer trois catégories, qui correspondent à trois familles distinctes qui ne seront pas traitées de la même manière, notamment lors de l'inspection et de la mesure :

- **Zone A** : Les composants sont considérés comme quasi-rigides, c'est-à-dire que les déformations engendrées par les efforts liés à l'inspection (bridage, contact du palpeur, ...) influent de façon non significative sur le respect des tolérances (moins de 5% de la valeur des tolérances requises). C'est le cas par exemple des pièces mécaniques classiques comme les carters, bielles, vilebrequins...
- **Zone B** : Les composants sont considérés comme flexibles, c'est-à-dire que les déformations qu'ils peuvent subir lors de l'inspection sont supérieures à 10% de la valeur des tolérances requises, et peuvent éventuellement dépasser la valeur de ces tolérances. C'est le cas par exemple des pièces de carrosserie automobile, morceaux de fuselage aéronautique...
- **Zone C** : Les composants sont considérés comme très flexibles, c'est-à-dire que les déformations qu'ils peuvent subir sont d'un ordre de grandeur très supérieur à la valeur des tolérances requises. C'est le cas par exemple des tissus.

Les frontières ne sont pas clairement délimitées, mais ces zones permettent de faire ressortir trois familles qui impliqueront des conditions et des contextes d'inspection complètement différents. C'est dans les *zones A* et *B* que se situent les composants impliqués dans ces travaux. D'une part on supposera que les composants qui seront considérés comme *rigides* se déformeront de manière négligeable (par rapport aux valeurs des tolérances requises) sous les efforts mis en jeu lors de la mesure et de l'assemblage (*zone A*). D'autre part on supposera que les composants qui seront considérés comme *flexibles* se déformeront de manière non négligeable (par rapport aux valeurs des tolérances requises) sous les efforts mis en jeu lors de la mesure et de l'assemblage, sans toutefois être d'un ordre de grandeur très supérieur (*zone B* uniquement). Les notions de *souplesse*, de *flexibilité* et de *non-rigidité* sont utilisées dans la littérature afin de caractériser un comportement de pièce déformable. Ces différents termes seront employés dans ce manuscrit, et seront considérés comme synonymes.

Enfin, on considérera dans un premier temps les matériaux métalliques, qui offrent plus de garanties quant à la modélisation de leur comportement mécanique. Les matériaux composites seront également étudiés, sans toutefois aller jusqu'à la simulation d'assemblage impliquant de tels composants. En effet, la caractérisation par la mesure du comportement mécanique anisotrope d'un composite est relativement complexe. Les problèmes liés à l'évaluation des défauts géométriques typiques des composites seront bien entendus abordés.

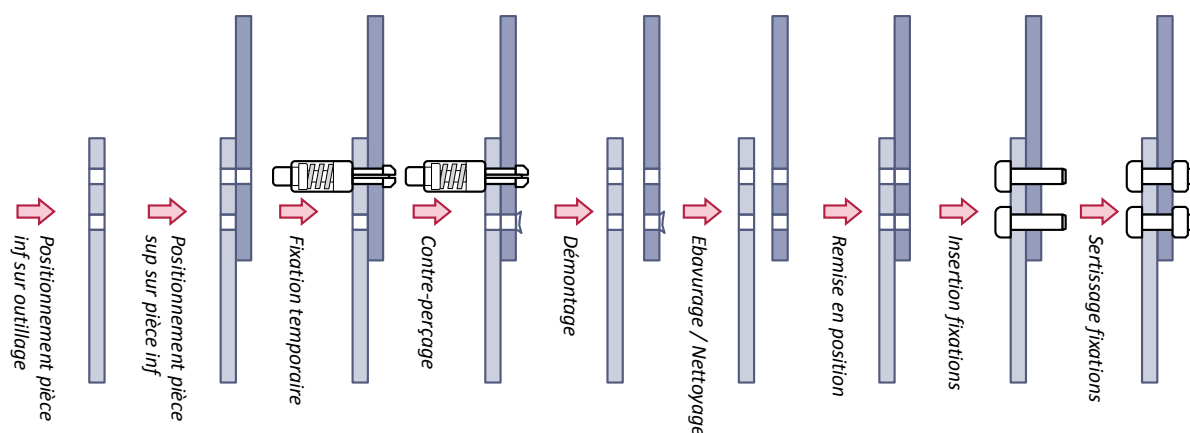


Figure 1.4 – Scénario classique d'assemblage de deux plaques (outillage non représenté).

3 Processus industriel d'assemblage aéronautique

Le processus industriel d'assemblage a pour fonction, à partir de pièces élémentaires, de réaliser le produit assemblé tout en garantissant le respect des exigences initiales exprimées sur celui-ci. Dans le contexte de l'assemblage de structures aéronautiques, il doit cependant faire face à différentes contraintes qui sont principalement :

- ✈ Le grand nombre de composants (plusieurs milliers).
- ✈ Les défauts géométriques et la flexibilité des composants.
- ✈ Le grand nombre d'opérations d'assemblages et leur diversité.
- ✈ La nécessité de réaliser des opérations de fabrication durant la phase d'assemblage.
- ✈ La provenance des composants de différents sites géographiques.
- ✈ Les éventuelles évolutions du produit en cours de production.

Toutes ces contraintes font du processus industriel d'assemblage aéronautique un processus extrêmement complexe. Des outils, des méthodes et des technologies spécifiques sont mis en œuvre afin de mener à bien ce processus. C'est ce dont fait l'objet cette section.

3.1 Description du processus

Il est difficile de résumer le processus d'assemblage de structure aéronautique tant le nombre d'opérations différentes et les configurations envisageables sont nombreuses. On peut toutefois se limiter aux opérations qui sont impliquées dans le contexte de ces travaux, et illustrer leur déroulement sur un exemple simpliste, visible sur la *Figure 1.4*. Il s'agit ici de l'assemblage de deux plaques. Le composant inférieur est mis en position sur l'outillage dédié, puis le composant supérieur est à son tour mis en position sur le composant inférieur. Le trou supérieur participe ainsi à la propagation des écarts géométriques entre les deux composants. Un trou est ensuite réalisé dans le composant supérieur par *contre-perçage*. Cette méthode permet de limiter les coûts liés à la réalisation des composants, tout en garantissant leur assemblabilité. En effet, la spécification concernant la position relative des deux trous sera vérifiée quelle que soit la valeur de la tolérance. Les composants sont ensuite démontés afin de procéder à l'ébavurage et au nettoyage. Ils sont enfin assemblés définitivement.

Ces opérations résument assez bien le processus d'assemblage du point de vue de la propagation des écarts géométriques. A ces opérations s'ajoutent généralement des opérations de peinture, de dépose de mastic, de réglage, de mesure ou de calage. L'enchaînement des opérations est défini par la *séquence d'assemblage*. Sur des assemblages plus complexes, différentes séquences peuvent exister. Il s'agit alors de

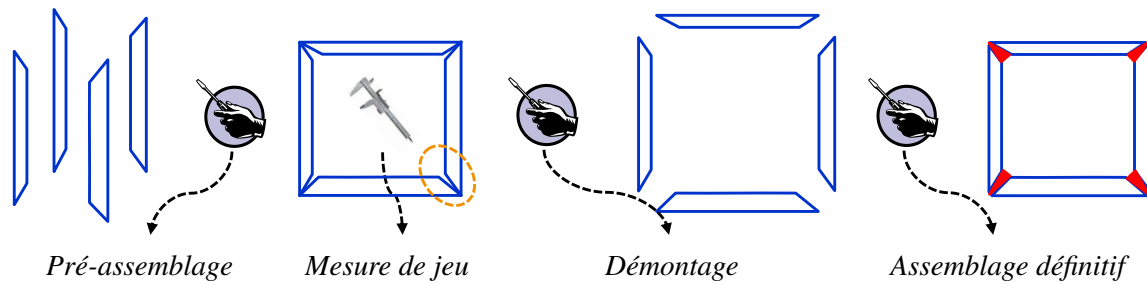


Figure 1.5 – Schéma de principe du processus d'assemblage classique d'un sous-ensemble (outillage non représenté).

choisir la plus performante suivant les critères fixés (coût, temps, qualité). A chacune de ces opérations sont allouées des *techniques d'assemblage*, qui font intervenir différentes ressources. En plus des aspects de temps et de coût, ces techniques auront également un impact sur la propagation ou non des écarts géométriques. La définition de tous ces éléments participe à l'élaboration de la *gamme d'assemblage*.

L'assemblage ne se passe pas toujours dans d'aussi bonnes conditions. Souvent, du fait des défauts géométriques et de la souplesse des composants, il est nécessaire de procéder à des opérations de réglage et de calage. Dans les deux cas s'ajoutent à cela des opérations de mesure. Sur la *Figure 1.5* est schématisé de façon succincte le processus d'assemblage d'un sous-ensemble nécessitant un calage aux interfaces entre les composants. Il s'agit dans ce cas, une fois les composants pré-assemblés et maintenus entre eux à l'aide des épingles de pré-assemblage, de mesurer les jeux aux interfaces. Suivant le résultat de la mesure plusieurs options alors sont possibles :

- ✦ Si les jeux mesurés sont inférieurs à la valeur admissible correspondant à l'exigence à l'état pré-assemblé, la fin de l'assemblage se déroule normalement suivant une procédure similaire à celle présentée sur la *Figure 1.4*. Sur des assemblages impliquant un grand nombre d'interfaces entre composants, ce n'est jamais le cas.
- ✦ Si les jeux mesurés sont supérieurs à la valeur admissible correspondant à l'exigence à l'état pré-assemblé, mais inférieurs à une valeur seuil, une procédure de *calage liquide* est mise en œuvre. Il s'agit alors de réaliser les cales en injectant une résine entre les composants pré-assemblés. Cette méthode permet de générer une cale qui a une forme très proche de celle du jeu à combler. Cependant il est nécessaire de procéder à un premier démontage pour préparer les composants, ce qui consiste à déposer des films protecteurs notamment, puis un second démontage pour récupérer ces films. De plus cette méthode nécessite une immobilisation de la structure assemblée de l'ordre de 24 heures afin de permettre le séchage des cales. Enfin, le coût du matériau utilisé pour la réalisation de ces cales est extrêmement important.
- ✦ Si les jeux mesurés sont supérieurs à la valeur admissible correspondant à l'exigence à l'état pré-assemblé, et également à la valeur seuil, une procédure de *calage classique* est mise en œuvre. Il s'agit alors de réaliser des cales dont la géométrie correspond aux mesures réalisées. La géométrie des cales dépend alors très fortement de ces mesures. La structure est immobilisée durant le temps de réalisation des cales. La réalisation des cales peut parfois être compliquée du fait de leur relative faible épaisseur. Des cales effeuillables sont parfois utilisées, mais le coût lié à cette utilisation est très important.

Ainsi se succèdent les nombreuses étapes d'assemblage, afin de générer d'abord des sous-ensembles, puis des lots, des tronçons et enfin l'avion. Toutes ces opérations nécessitent des ressources humaines et matérielles considérables. Elles représentent au final le tiers du prix de l'avion, principalement à cause de la durée d'assemblage. D'où la nécessité de réduire le recours aux opérations non-productives et coûteuses en temps.



Figure 1.6 – Atelier d'assemblage de la pointe avant d'un Airbus A380 (images Aerolia).

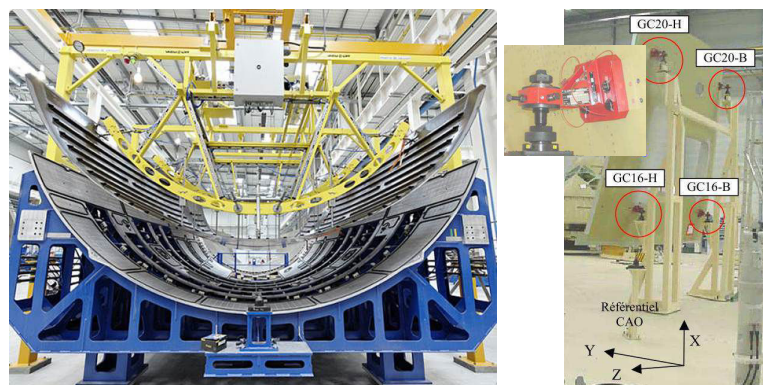


Figure 1.7 – Outillage permettant de conformer un panneau (à gauche), et panneau monté sur un outillage réglable (à droite) (images Aerolia).



Figure 1.8 – Opérations d'assemblage et de perçage (images Aerolia).

3.2 Outils et technologies spécifiques

Du fait des dimensions importantes des composants, les outillages utilisés sont également de dimensions importantes. Ces outillages sont parfois équipés de systèmes de réglage, afin de rattraper les variations géométriques conséquences des défauts géométriques des composants et de leur souplesse. Des outillages de ce type sont visibles sur la *Figure 1.7*. Dans les deux cas les outillages soutiennent des panneaux de plusieurs mètres de long. Sur la figure de droite, quatre appuis équipés de systèmes de réglage sont disposés aux quatre coins du panneau, afin d'ajuster le positionnement de celui-ci en vue de sa mesure ou de son assemblage.

Ces outillages, dédiés à un type de composant particulier, représentent un coût important pour l'entreprise. D'une part à cause des systèmes de réglage dont ils sont équipés. D'autre part à cause de leur caractère dédié, qui implique un nombre conséquent d'outillages fonction du nombre de composants différents à assembler. De plus ces outillages sont conçus spécifiquement en fonction du produit à assembler. Il est ensuite difficile de les réadapter pour l'assemblage d'un modèle différent.

De nombreuses opérations de fabrication sont réalisées au cours du processus d'assemblage. Il est possible d'évoquer les opérations de perçage et de contre perçage notamment. La réalisation de ces opérations au cours de l'assemblage permet principalement d'absorber les variations géométriques générées lors de l'assemblage. La *Figure 1.8* illustre ainsi une opération de perçage, réalisée par un robot, sur un composant de la pointe avant de l'avion. Des opérations de peinture ou de dépose de mastic sont également réalisées au cours de l'assemblage, et viennent modifier les géométries des composants et leur aspect de surface.

Des opérations de mesure font également partie intégrante du processus d'assemblage. Elle permettent notamment de prévoir les réglages à effectuer au niveau des outillages afin de placer les composants dans une configuration d'assemblage idéale. Elles permettent également de suivre l'évolution de la géométrie du produit au cours de l'assemblage. On distingue principalement les systèmes de mesure à grande échelle, tels que les *LASER trackers*, qui permettent de suivre la position de quelques points caractéristiques de la position et de la géométrie de certains sous-ensembles. D'autres systèmes de mesure permettent d'acquérir des informations à plus petite échelle, tels que les capteurs *LASER* ou les systèmes de vision.

Enfin, les chaînes d'assemblage sont de plus en plus automatisées. Sur les *Figures 1.6* et *1.8* sont visibles des postes d'assemblage sur lesquels opèrent des robots anthropomorphes. Ceux-ci sont utilisés afin de réaliser des opérations d'assemblage proprement dites (rivetage notamment), mais également des opérations de perçage et de mesure. Le recours à des opérations manuelles reste toutefois nécessaire dans certains cas, notamment lorsque l'accessibilité à la zone de travail devient problématique.

3.3 Limites actuelles

De part la présence de matériaux composites, il n'est pas possible dans le cas des structures aéronautiques actuelles de rattraper les écarts géométriques en exerçant des efforts importants sur les pièces pour les assembler. Ils seraient sources de contraintes internes installées trop importantes, qui nuiraient à l'intégrité même du matériau. Il n'est ainsi plus possible de fermer les jeux lors de l'assemblage. Ceci nécessite alors le recours au calage des composants. Celui-ci requiert cependant des opérations très coûteuses en temps, telles que la mesure de jeu. De plus la redondance des opérations de montage et démontage des composants sur le poste d'assemblage augmente également la durée totale de l'opération. Les composants sont immobilisés durant la fabrication des cales, voire également les outillages. Tout ceci contribue à repousser dans le temps l'assemblage définitif de la structure.

Outre l'aspect chronophage de ces opérations de calage, c'est leur caractère non-systématique qui est problématique. En effet, les variations géométriques au niveau des composants peuvent mener à des géométries d'assemblage de natures différentes. Il n'est alors pas simple d'anticiper, lors de l'assemblage de deux

composants comportant plusieurs interfaces de liaisons, où se situeront les contacts et les jeux, et quelles seront leurs géométries. Ainsi la procédure d'assemblage est adaptée à chaque nouveau produit à assembler.

Enfin, le recours à des opérations manuelles est parfois dommageable. Effectivement, en plus des temps d'opération qui peuvent être importants, on peut évoquer des problèmes liés à la variabilité engendrée par le caractère manuel de ces opérations. Dans un contexte où la gestion des variations géométriques représente un élément clé, l'automatisation de certaines opérations critiques est un enjeu majeur.

4 Tolérancement et assistance à l'assemblage

Le *tolérancement* est un domaine dans lequel le concepteur cherche à définir les tolérances admissibles au niveau des composants d'un produit, dans le but de garantir le respect des exigences fonctionnelles au niveau du produit une fois celui-ci assemblé. Plusieurs définitions existent dans la littérature. Le *tolérancement* est ainsi défini par [Mathieu, 2007] comme une « *discipline servant à maîtriser les variations géométriques des produits tout au long de leur cycle de vie* ». La notion de *maîtrise des variations géométriques* est ainsi l'objectif principal du *tolérancement*. [Petit, 2004] définit quant à lui le *tolérancement* comme « *un moyen de communication entre les différents métiers participant aux phases d'élaboration d'un produit : conception, fabrication et contrôle* » dont le but est de « *fixer les limites des défauts sur ces pièces de façon univoque et qui soit compréhensible pour chacun des acteurs intervenant dans le cycle d'élaboration du produit* ». Cette définition met ainsi en avant les problèmes rencontrés dans la pratique afin de garantir la maîtrise des variations géométriques tout au long de la *chaîne numérique*. Le domaine de la simulation, qui occupe une place importante dans le cadre de la réalisation de produits aéronautiques notamment, pourrait également être mentionné en tant que phase d'élaboration d'un produit à part entière.

L'ouvrage [Mathieu et Villeneuve, 2007] synthétise les résultats de la recherche des équipes françaises sur le sujet du tolérancement géométrique des produits. Il offre une vision des différents domaines d'activités en tolérancement, concernant principalement la spécification des produits, la simulation des comportements géométriques des assemblages avec défauts et la vérification des spécifications.

Le concept de *Spécification Géométrique des Produits* (ou *GPS* pour *Geometrical Product Specification*), retenu par le *TC213* de l'*ISO*, permet d'aider le concepteur à réaliser le tolérancement d'un produit. Parmi les normes proposées, on retrouve notamment la norme [ISO 10579, 2010] concernant la cotation et le tolérancement des pièces non-rigides. Toutes ces normes tentent d'apporter des solutions aux problèmes concrets rencontrés par les industriels et de lever les ambiguïtés rencontrés au cours du cycle de réalisation d'un produit. Cependant la procédure de normalisation étant longue et complexe, de nombreux problèmes sont aujourd'hui peu ou pas solutionnés. On peut par exemple citer un manque concernant le cadre de mise en œuvre des systèmes de mesure sans contact, pourtant de plus en plus utilisés.

Le processus classique de *tolérancement*, détaillé sur la *Figure 1.9*, repose sur quatre activités principales qui sont les suivantes :

- ✦ La *synthèse des exigences géométriques* : elle permet de déterminer les exigences fonctionnelles décrites sous forme géométrique.
- ✦ La *synthèse des spécifications fonctionnelles* : elle permet le transfert d'une exigence géométrique en spécification dimensionnelle et géométrique.
- ✦ L'*analyse des tolérances* : elle permet de déterminer l'influence des tolérances sur les exigences géométriques du produit.
- ✦ La *synthèse des tolérances* : elle permet de déterminer les valeurs optimales des tolérances pour respecter l'ensemble des exigences.

L'*analyse* et la *synthèse des tolérances* reposent sur une modélisation de l'assemblage du produit : la *relation de comportement de l'assemblage*, terme introduit dans [Andolfatto, 2013]. Cette relation est du

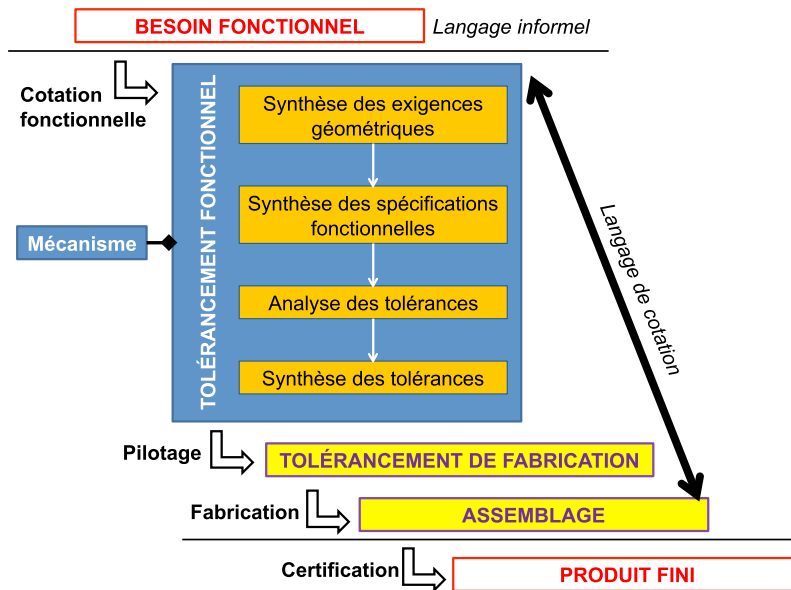


Figure 1.9 – Processus de tolérancement [Chavanne, 2012].

type $y = f(x)$ [Evans, 1974] [Hong et Chang, 2002]. Elle permet d'exprimer les caractéristiques du produit sur lesquelles reposent les exigences fonctionnelles (y), en fonction des écarts géométriques au niveau des composants à assembler et des écarts géométriques qui sont conséquences du processus d'assemblage (x). Les outils de tolérancement reposent ainsi sur différentes hypothèses de modélisation concernant cette relation.

4.1 Méthodes et outils de tolérancement

[Hassani *et al.*, 2009] réalise un état de l'art dans lequel il classe les principales méthodes de tolérancement. Cette classification est visible dans le *Tableau 1.3*. On distingue deux familles distinctes qui sont :

- ✦ Les méthodes *arithmétiques* : elles permettent un tolérancement *au pire des cas*. En effet, les tolérances sont considérées à leur valeur maximale. Elles garantissent le respect des exigences au niveau du produit assemblé quelle que soit la géométrie des composants respectant les spécifications. Ces méthodes garantissent une interchangeabilité totale des composants de l'assemblage.
- ✦ Les méthodes *statistiques* : elles permettent un tolérancement *statistique*. L'objectif est d'atteindre un *taux de non-conformité* imposé. Cela offre notamment la possibilité d'élargir les valeurs des tolérances sur les composants. Cependant l'interchangeabilité totale n'est plus garantie.

Dans le contexte de l'assemblage aéronautique industriel, les méthodes arithmétiques sont employées depuis des années. On peut citer les logiciels *MECAmaster* [Clozel, 1990] et *AnaTole* [Marguet *et al.*, 2003], basés sur les concepts de *chaîne de cotes* et de *Torseur des Petits Déplacements* [Bourdet et Clement, 1988]. Elles reposent cependant sur l'hypothèse forte de rigidité des composants. Ainsi dans le cas d'assemblages hyperstatiques, il est nécessaire de relaxer des contraintes cinématiques, afin de pouvoir solutionner le problème posé. Lorsque les composants sont trop souples, la modélisation du problème n'est plus adaptée, et l'utilisation de ces outils n'est plus possible.

D'autres méthodes ont ainsi été développées afin de prendre en compte cette souplesse dans l'établissement de la *relation de comportement de l'assemblage*. Ces méthodes seront présentées dans la *Section 2.1.4* du *Chapitre 2*. La relation de comportement de l'assemblage est alors trop complexe pour être traitée de

Méthodes		Principe	Avantages	Inconvénients
Arithmétiques	Chaine de cotes	Calcule la cote condition à partir de la chaînes de cotes	Mise en œuvre simple / Assure l'interchangeabilité totale des pièces et assemblages	Limitée aux tolérances dimensionnelles / Appliquée aux solides rigides / Gourmande en temps de calcul
	Domaines des jeux et écarts	Opère une linéarisation des déplacements infinitésimaux d'un solide / Enonce les équations fonctionnelles / teste l'assemblabilité d'un mécanisme	Modélise graphiquement les zones de tolérances / Prend en compte les jeux dimensionnels et angulaires	Appliquée aux solides rigides / Gourmande en temps de calcul
Statistiques	Racine de la somme carrée	Calcul la cote condition à partir de la série de Taylor	Simplicité de mise en œuvre	Utilisée pour des fonctions linéaires de la cote condition
	Croft	Approxime une distribution tronquée par une distribution rectangulaire	Meilleure que la méthode de la racine carrée pour un nombre restreint de paramètres	Probabilité d'apparition des valeurs extrêmes la même que toutes les autres valeurs
	Série de Taylor	Résout analytiquement les expressions des chaînes de cotes	Calcul de l'expression de la chaîne de cotes linéaire et non-linéaire	Complexité des dérivées partielles pour le calcul des chaînes non-linéaires
	Inertielle	Utilise la fonction coût de Taguchi / Minimise les inerties	Distribution aléatoire des écarts / Meilleur compromis coût de production-qualité	Acceptabilité limitée par la dépendance de l'élément à la population étudiée
	Taguchi	Utilise la fonction coût de Taguchi / Assure une distribution en trois temps	Simplicité / Application pour les distributions normales	Difficulté d'application pour les distributions non-normales / Résultats sur les moments
	Monte-Carlo	Echantillonne aléatoirement les distributions / Simule numériquement	Simplicité de mise en œuvre / Très utilisée / Précise pour N importante / Application avec une loi quelconque	Nombre d'itérations N important / Gourmande en temps de calcul
	Quadratique	Détermine les dérivées partielles de la chaîne de cotes	Etude des cas non-linéaires et pour le calcul des dérivées partielles	Gourmande en temps de calcul

Tableau 1.3 – Classification des méthodes d'analyse et de synthèse des tolérances [Hassani *et al.*, 2009].

façon arithmétique. Il est ainsi nécessaire d'utiliser des modèles *Eléments Finis* par exemple. Un tel modèle est ensuite utilisable de manière relativement simple pour réaliser une analyse de tolérance à l'aide d'une méthode de *Monte-Carlo*.

4.2 Assistance à l'assemblage par la mesure

Les modèles de *relation de comportement de l'assemblage* développés sont également utilisés dans le contexte de l'assistance à l'assemblage. Les outils développés permettent alors d'assister l'opérateur au niveau du poste d'assemblage. Par exemple l'outil *FitFlex* développé dans les travaux de thèse de [Breteau, 2009] permet d'assister le réglage de l'assemblage par la mesure. Ces travaux, qui reposent sur le modèle développé par [Cid, 2005], permettent de définir à partir de mesures réalisées en certains points de la structure pré-assemblée, les réglages à réaliser au niveau des outillages d'assemblage afin de placer les composants dans une configuration permettant un assemblage correct. Cet outil, utilisé industriellement, permet un gain de temps considérable au niveau de l'opération d'assemblage. Il n'y a plus besoin d'avoir recours aux mesures et réglages itératifs basés sur l'expérience de l'opérateur.

La mesure est en effet un moyen d'apporter de l'information concernant l'état géométrique des composants et de l'assemblage réel. Dans le contexte de l'assemblage aéronautique impliquant de nombreux composants souples, à géométrie variable, elle est d'autant plus importante puisqu'elle va permettre de suivre l'évolution de cet état géométrique au cours de l'assemblage.

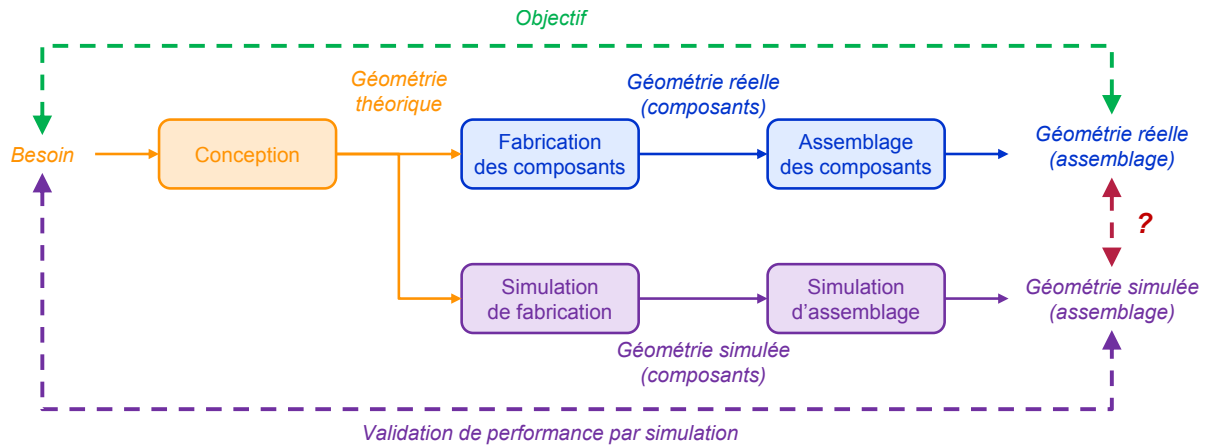


Figure 1.10 – Processus de réalisation d'un produit.

De nombreux travaux s'intéressent aux systèmes de mesure qui sont mis en œuvre dans le cadre de la mesure de composants souples de grandes dimensions. Un état de l'art de ces systèmes sera dressé en *Section 2.1.2 du Chapitre 3*. Au-delà de l'étude de ces systèmes, l'étude de leur mise en œuvre dans un cadre industriel afin d'assister les opérateurs fait l'objet de divers travaux. L'équipe de Maropoulos notamment, de l'université de Bath, travaille sur cette thématique [Maropoulos *et al.*, 2008] [Maropoulos *et al.*, 2011] [Muelaner et Maropoulos, 2010] [Muelaner *et al.*, 2011] [Jamshidi *et al.*, 2010] [Vichare *et al.*, 2013] [Martin *et al.*, 2011]. L'objectif commun de ces travaux est l'intégration des processus de mesure au sein du processus d'assemblage afin d'en améliorer les performances. Sont ainsi traités la définition des processus de mesure en fonction du produit à assembler et de la gamme de mesure définie, l'automatisation des processus de mesure, l'optimisation des processus de mesure, l'assistance par la mesure au réglage sur poste d'assemblage, le suivi de production et la traçabilité des géométries.

5 Positionnement des travaux

Dans le contexte de réalisation d'un produit, il est nécessaire de valider les performances du produit à différents stades de la conception. Ceci permet de vérifier que le produit conçu remplira le besoin pour lequel il est réalisé. Au stade de la conception le produit physique n'existe pas encore, et dans le domaine aéronautique, il n'est pas envisageable de réaliser un prototype grandeur réelle afin de valider ses performances. Les industriels s'orientent alors vers la validation par la simulation numérique, moins coûteuse en temps et en argent. Cette simulation repose sur différentes modélisations du produit et de son environnement, et permet de calculer la réponse du produit à différentes sollicitations. Cette réponse est cependant différente de la réponse réelle puisque les modèles reposent généralement sur des hypothèses simplificatrices. Afin de valider les modèles utilisés pour la simulation, il est nécessaire de s'assurer que cet écart reste relativement faible. Cette démarche est visible sur la *Figure 1.10*.

Il est toutefois nécessaire de confronter la simulation et le réel afin de déterminer cet écart. Cela passe par des essais menés sur des prototypes (maquettes, modèles-réduits, sous-ensembles, ...). Ces essais sont simulés en parallèle, et les résultats sont confrontés. Il est primordial de définir un support expérimental qui reflète les caractéristiques du produit et son environnement, et de modéliser correctement celui-ci. Il est également important d'instrumenter correctement ce support afin d'observer la réponse du produit qui correspond à la réponse simulée.

Ces travaux de thèse se situent dans le contexte de la validation, par la mesure, de simulations d'assemblage. Il s'agit de confronter les résultats de simulation d'assemblage à des résultats de mesure effectués sur un assemblage physique. Cela passe par une étude des grandeurs qui régissent un assemblage flexible, et par

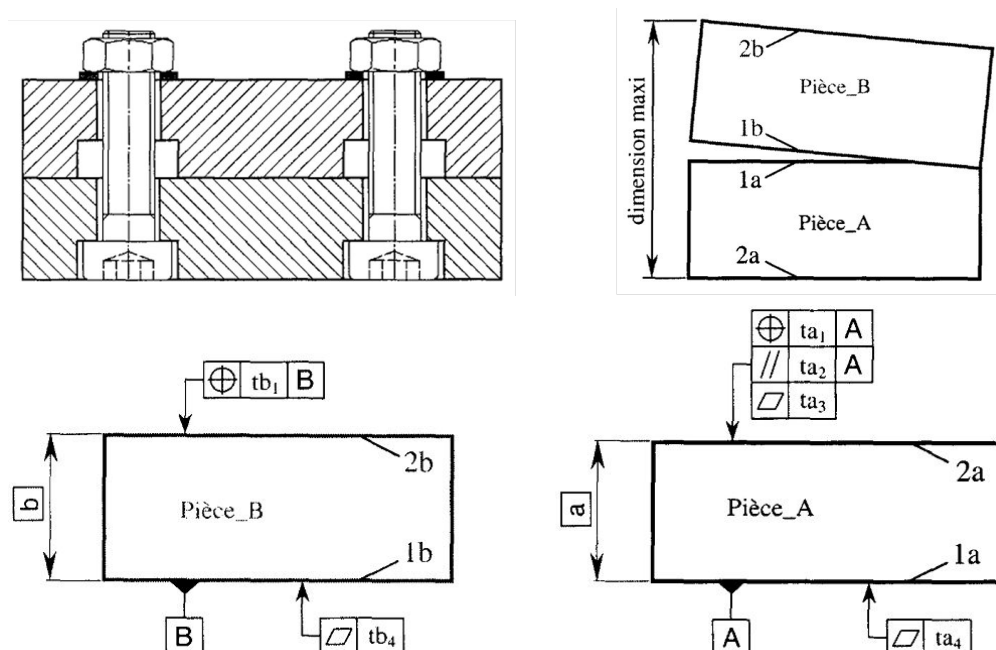


Figure 1.11 – Validation expérimentale du modèle de *chaîne de cotes* [Radouani, 2003].

le choix de modèles de description de ces grandeurs, communs ou non aux domaines de la simulation et de la mesure, qui permettent de réaliser la comparaison. La définition d'un support expérimental représentatif des problématiques aéronautiques détaillées précédemment est également attendue.

5.1 Validation expérimentale de simulations d'assemblage

Différents travaux ont tenté de valider des modèles définissant le comportement géométrique des composants au cours de l'assemblage. Cette section présente certains de ces travaux issus de la littérature, afin de mettre en avant les contraintes principales liées à la validation expérimentale dans le cadre de l'assemblage de composants.

Tout d'abord [Radouani, 2003] a cherché à valider expérimentalement le modèle de *chaîne de cotes*. L'un des cas d'étude est visible sur la Figure 1.11. Il s'agit d'une liaison plane sans jeu entre deux composants rigides. La procédure de mesure consiste d'abord à palper des points sur les éléments tolérancés (2a et 2b) et de référence (1a et 1b) pour chaque composant A et B. Puis les éléments tolérancés sont re-mesurés une fois l'assemblage effectué. Un plan est associé à chaque élément mesuré (différents critères sont étudiés). Il est alors possible de retrouver la position relative des deux éléments de référence à l'état assemblé. Sont alors extraits un *dépassement* et une *interpénétration*, qui sont ensuite comparés aux valeurs de *défauts de forme* évalués par la mesure des différents éléments. Dans les deux cas, l'étude expérimentale arrive à la conclusion que les dépassements et interpénétrations sont toujours inférieurs à la somme des défauts de planéité des deux surfaces en contact. L'étude de la répartition des résultats de mesure pour plusieurs assemblages met également en avant l'intérêt des méthodes statistiques, puisque peu d'assemblages conduisent à des résultats proches des extrêmes. Une liaison appui plan - centrage court avec jeu dans la liaison secondaire a également été étudiée.

[Dantan *et al.*, 2007] ont développé un modèle vectoriel de tolérancement d'engrenages qui se veut adapté à toutes les étapes de réalisation du produit. Il permet de modéliser les assemblages avec mobilité de composants rigides avec défauts. [Bruyère *et al.*, 2007] étudie l'assemblage d'engrenages coniques. Le modèle mis en place considère le jeu, le contact, les défauts géométriques ainsi que les mouvements entre

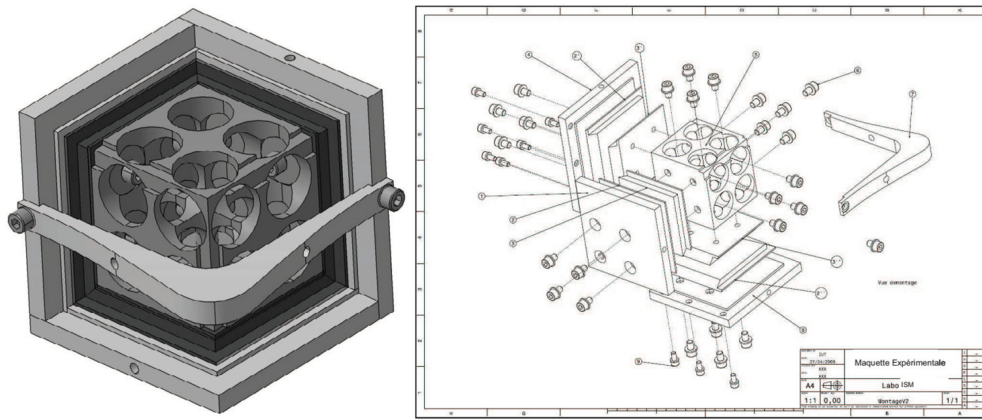


Figure 1.12 – Assemblage expérimental [Moriere, 2010].

les composants. Il simule l'assemblage de deux engrenages en imposant un désalignement entre leurs axes. Les composants sont considérés sans défauts. Il réalise l'assemblage physique et mesure les effets de ce désalignement, puis il les compare aux effets simulés. Aucuns détails ne sont donnés concernant la procédure de mesure. Il observe cependant une corrélation entre les résultats puisque les assemblages mesuré et simulé se comportent globalement de la même façon. Les écarts sont principalement dus à la non prise en compte des défauts géométriques de forme au niveau des composants lors de la simulation.

Toujours en rigide mais sans mobilités, [Moriere, 2010] a développé un modèle permettant de représenter la géométrie par une matrice de *Gram*, des coordonnées *contravariantes* et la *topologie*. A cela s'ajoutent des opérateurs de *Connexion* pour modéliser les liaisons et de *Perturbation* pour modéliser les défauts géométriques de position et d'orientation. Le défaut de forme est modélisé par des surfaces polynômiales. L'assemblage est paramétré avec une fonction objectif (qui caractérise l'ensemble des espaces jeux de l'assemblage) et une fonction contrainte (qui caractérise la non-interpénétration des pièces lors de l'optimisation). La simulation d'assemblage consiste en la résolution d'un problème d'optimisation, dont les paramètres libres sont l'orientation et la position relatives des composants, et dont l'objectif est la minimisation du volume jeu entre les composants.

Il procède ensuite à la validation expérimentale de son modèle. Un support expérimental, visible sur la Figure 1.12, a été conçu pour l'occasion. La procédure de mesure est semblable à celle mise en œuvre par [Radouani, 2003], et consiste à mesurer sur chaque composant les trois surfaces de liaison et les trois surfaces de référence. Les surfaces de référence sont alors re-mesurées une fois l'assemblage réalisé. Aux points de mesures des éléments de référence sont associés des plans. Aux points de mesures des éléments de liaison sont associés des surfaces polynômiales de degré 2 (surfaces concaves ou convexes). La validation se fait alors par comparaison entre les résultats de simulation à partir des mesures des composants et les résultats de mesure concernant la position relative des composants assemblés. L'auteur remarque des écarts importants entre les résultats de simulation et de mesure, malgré les précautions prises pendant les expérimentations (séquence d'assemblage imposée, étude de la répétabilité, ...), ce qui tend à invalider le principe de minimisation du volume jeu pour modéliser le comportement de l'assemblage.

Les travaux de thèse de [Lê, 2013] visent à prendre en compte les défauts de forme des composants dans la modélisation du comportement d'une liaison autorisant un débattement entre ces deux composants. La démarche suivie pour la validation expérimentale est présentée sur la Figure 1.13. A partir d'une mesure de chaque surface en contact, il simule l'assemblage de ces deux surfaces. La simulation repose sur la notion de *surface convexe des différences* afin de déterminer les contacts entre les composants. Il compare ensuite ce résultat à une mesure expérimentale du débattement. La mesure du débattement est réalisée comme détaillé dans [Ballu, 2009b]. Plus précisément il compare les *domaines jeux* déterminés par la mesure du

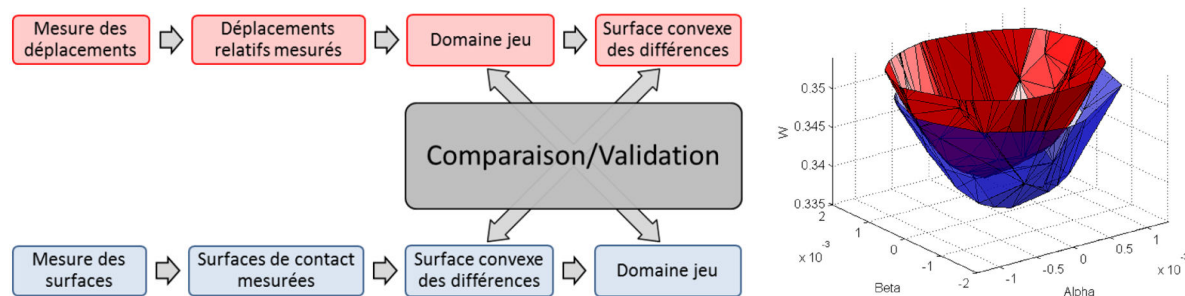


Figure 1.13 – Démarche de validation expérimentale suivie par [Lê, 2013], et comparaison des domaines jeux évalués par la mesure et par la simulation.

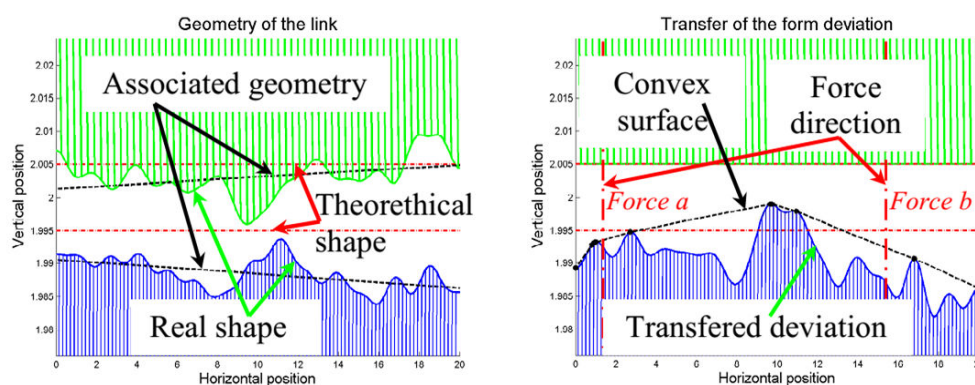


Figure 1.14 – Notion de *surface convexe des différences* [Adragna et al., 2010]

débattement, et par la simulation de l'assemblage, visibles sur la *Figure 1.13*. La comparaison des formes et des positions relatives de ces domaines permet de conclure quant à la validité ou non de la modélisation, pour différents type d'assemblages (contacts plan - plan, 3 sphères - plan, 36 sphères - plan, surface vrillée - plan, ...).

[Adragna, 2007] [Adragna et al., 2010] présente une méthode de simulation d'assemblage 2D de deux composants rigides permettant de prendre en compte leur défaut de forme. Celui-ci est modélisé par une superposition de modes correspondant à une signature modale prédéterminée. La modélisation du contact repose sur la notion de *surface convexe des différences*, visible sur la *Figure 1.14*. L'analyse statistique de l'assemblage de pièces dont le défaut de forme est proche de cette signature modale est réalisée. Elle permet de déterminer de façon statistique le taux de validité des assemblages en analysant le *domaine jeu* simulé et en le comparant au *domaine jeu* correspondant à la spécification à respecter.

Dans [Samper et al., 2009] la méthode est également appliquée à des assemblages 3D. On peut observer l'influence du défaut de forme sur la validité de l'assemblage final sur la *Figure 1.15*. Les résultats de simulation d'assemblage avec et sans prise en compte du défaut de forme sont très différents. La non prise en compte du défaut de forme tend à conclure quant à la validité de certains assemblages alors que la prise en compte de celui-ci tend à conclure quant à la non validité de ceux-ci.

[Grandjean, 2013] réalise l'étude d'un assemblage de prothèse de hanche. Il étudie également l'influence des défauts de forme sur le comportement d'un assemblage, avec et sans mobilité. La modélisation du contact est au centre de ses travaux (domaine de la *tribologie*). Il considère ainsi l'assemblage rigide avec déformations locales au niveau de la zone de contact. La modélisation de l'aspect rigide de l'assemblage est similaire à l'approche de [Adragna, 2007] et [Samper et al., 2009]. Il modélise également le phénomène d'érosion, déformation locale sous chargement qui modifie la configuration d'assemblage. Le support expérimental d'assemblage est visible sur la *Figure 1.17*. Il mesure d'abord les surfaces des deux composants qui seront

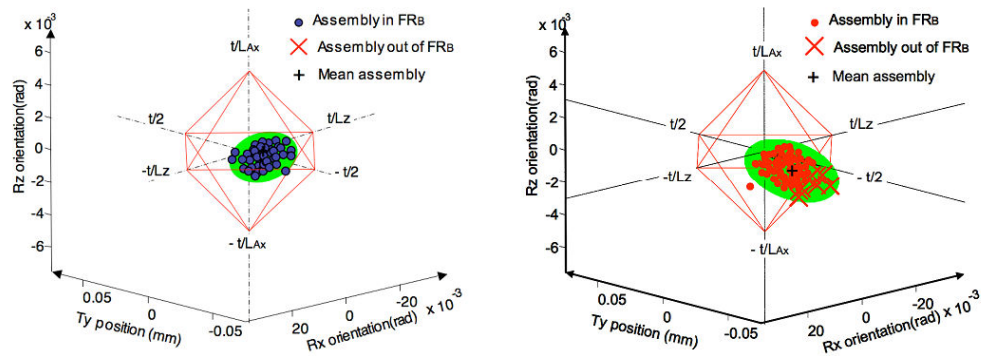


Figure 1.15 – Influence de la prise en compte des défauts de forme dans les liaisons [Samper *et al.*, 2009].

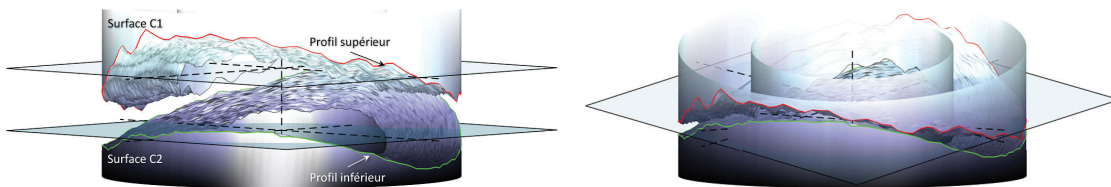


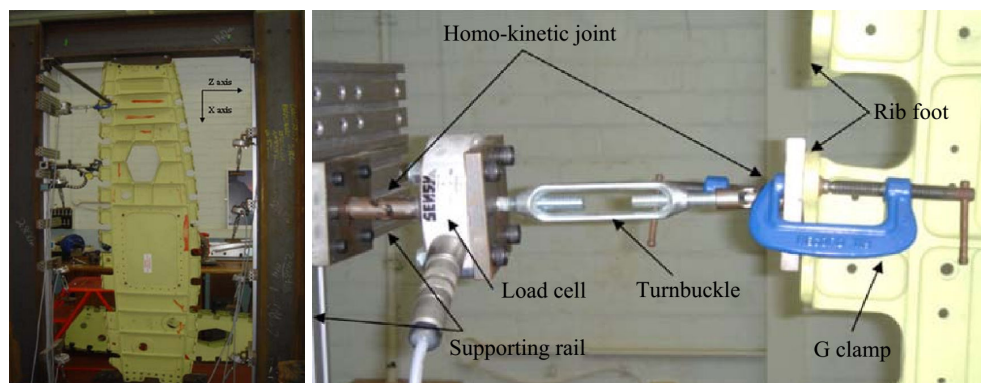
Figure 1.16 – Simulation d'assemblage [Grandjean, 2013].



Figure 1.17 – Support expérimental de validation d'assemblage [Grandjean, 2013].

en contact à l'aide d'un palpeur à contact, ainsi que les éléments de référence des composants. Le résultat de la simulation d'assemblage est visible sur la *Figure 1.16*. Il réalise l'assemblage physique et vient mesurer la position relative des composants à l'aide de 4 comparateurs (un indexage des deux composants en rotation permet de connaître la configuration angulaire de ceux-ci). Les écarts entre la simulation et la mesure sont inférieurs au 0.01 mm (suivant la normale au jeu nominal), ce qui tend à valider la modélisation des deux phénomènes intervenant lors de l'assemblage des composants.

Enfin, [Saadat *et al.*, 2007] [Saadat *et al.*, 2009] réalise l'étude d'un assemblage de structure aéronautique. Il considère dans ce cas la relative souplesse des composants assemblés. Un banc expérimental, visible sur la *Figure 1.18*, est conçu afin de pouvoir placer un *rib* dans les mêmes conditions que sur le poste d'assemblage. Concrètement chaque pied du *rib* est déformé afin de correspondre à la géométrie du composant assemblé (mesurée sur le poste d'assemblage). Douze capteurs permettent de relever les efforts générés au niveau des pieds afin de déterminer les efforts installés au cours de l'assemblage. La rigidité de la structure est déterminée en considérant les données de mesure en effort et en géométrie au niveau des pieds. La simulation d'assemblage est alors réalisée par *Eléments Finis*. Les positions simulées et mesurées des pieds sont

Figure 1.18 – Assemblage expérimental [Saadat *et al.*, 2007].

		Nature du modèle d'assemblage	
		Rigide	Flexible
Méthode de validation	Mesure de composants	[Radouani, 2003] [Dantan <i>et al.</i> , 2007] [Bruyère <i>et al.</i> , 2007] [Adragna, 2007] [Samper <i>et al.</i> , 2009] [Moriere, 2010] [Grandjean, 2013]	[Saadat <i>et al.</i> , 2007] [Saadat <i>et al.</i> , 2009]
	Mesure de jeu	[Lê, 2013] (indirecte) [Ballu <i>et al.</i> , 2007] (indirecte)	?

Tableau 1.4 – Synthèse concernant l'état de l'art de la validation de simulations d'assemblage.

comparées, à différents stades de l'assemblage. Les mesures sont réalisées au cours de l'assemblage réel de la structure sur le site de production. Les écarts entre les positions mesurées et simulées sont inférieurs au millimètre. L'auteur met en avant les difficultés à modéliser les efforts nécessaires à la pose des rivets, qui semblent être la cause principale d'erreur. Dans [Saadat, 2011] l'auteur s'attarde sur l'aspect modélisation de l'assemblage par rivetage. Il met en avant l'influence de la séquence de rivetage sur l'état de l'assemblage. La modélisation de ces actions mécaniques est apparemment relativement complexe.

Le *Tableau 1.4* résume les différents travaux détaillés précédemment. Parmi tous les travaux présentés concernant la validation expérimentale d'un modèle de comportement de deux pièces mises en contact l'une par rapport à l'autre, aucun ne cherche à mesurer ce qui se passe réellement à l'interface entre les deux composants. Ceci s'explique premièrement par le fait qu'il est difficile de réaliser des mesures à cet endroit à cause de problèmes liés à l'accessibilité. Une seconde raison est qu'en rigide, il est relativement simple de situer les éléments géométriques d'un même composant les uns par rapport aux autres, et que cette situation n'évoluera pas au cours de l'assemblage. Ceci n'est plus vrai en flexible, et il est alors nécessaire de simuler cette situation relative des éléments géométriques, ce qui peut être la cause d'incertitudes liées à la modélisation du comportement du composant et des interactions de celui-ci avec les autres composants de l'assemblage.

Il est possible d'évaluer ce qui se passe au niveau de la zone de contact entre les deux composants par une mesure indirecte, sous réserve de certaines hypothèses. Dans le cadre de ces travaux de thèse visant à simuler l'assemblage et à en déduire le jeu entre les composants assemblés, il serait intéressant d'observer ce qui se passe réellement à l'interface entre les deux composants pour valider le modèle de simulation d'assemblage.

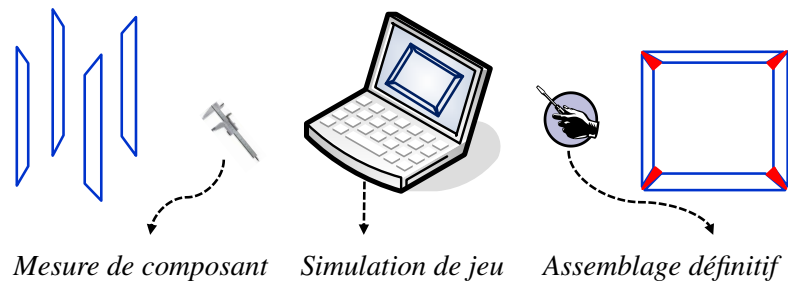


Figure 1.19 – Schéma de principe du processus d’assemblage d’un sous-ensemble envisagé dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS* (outillage non représenté).

5.2 Contexte du projet européen *LOCOMACHS*

Afin de respecter les commandes toujours plus importantes, les constructeurs aéronautiques se doivent d’augmenter les cadences afin de satisfaire les clients. Ainsi l’optimisation de la production, et notamment des opérations jugées comme non-productives, est un enjeu majeur. L’objectif principal du projet européen *LOCOMACHS* est la réduction significative ou la suppression des opérations non-productives ou les plus coûteuses au sein du processus de conception, de fabrication et d’assemblage d’un avion. Au niveau des opérations d’assemblage, différentes pistes d’amélioration sont envisagées afin de rendre le processus plus performant. Sont notamment ciblées les opérations de mesure de jeu lors du pré-assemblage et de calage des composants lors de l’assemblage final. En effet, ces deux opérations sont jugées non-productives du fait du temps important qu’elles nécessitent.

L’objectif pour réduire ou supprimer le recours à ces opérations passe, dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*, par le développement d’un outil de tolérancement flexible : *AnaTolFlex*. Cet outil s’appuie sur un code de calcul permettant la simulation d’assemblage intégrant notamment la flexibilité et la gestion du contact unilatéral entre les composants. Il permettra ainsi de réaliser un tolérancement plus réaliste dans le cas d’assemblages flexibles, ce qui conduira à un meilleur respect des exigences de jeu notamment, et donc limitera le recours au calage lors de l’assemblage réel. D’autre part il permettra, à partir de la mesure de composants isolés, de simuler le jeu entre ces composants assemblés, et ainsi de remplacer l’opération de mesure de jeu par des opérations de mesure de caractéristiques pièces plus communes. Ce dernier aspect est illustré sur la *Figure 1.19*.

Dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*, l’objectif est de démontrer expérimentalement que l’outil de tolérancement repose sur des modèles qui représentent de manière fidèle l’assemblage de structures aéronautiques. Pour cela il est nécessaire de concevoir un support expérimental permettant cette validation, et de définir la procédure de validation qui sera mise en œuvre. Cela passe tout d’abord par la détermination des grandeurs qui caractérisent les composants souples d’une part, et l’assemblage de ces composants d’autre part. Le support expérimental doit refléter la géométrie et les matériaux des composants mis en œuvre dans le domaine aéronautique. La procédure de validation doit permettre de mettre en avant les performances, au delà de la simulation d’assemblage, de la simulation de jeu à l’interface entre les composants assemblés à partir de données de mesure issues des composants seuls. Cette procédure doit englober tous les aspects du processus de simulation de jeu, tout en restant relativement simple afin de ne pas introduire de perturbations.

Le contexte des travaux de thèse, détaillé dans la *Section 5.3*, découle de cette nécessité de validation de l’outil *AnaTolFlex* développé dans le cadre de ce projet. Les spécificités et la mise en œuvre de cet outil seront abordées dans le *Chapitre 5*.

5.3 Contexte des travaux de thèse

Dans ce contexte industriel, les travaux de thèse s'inscrivent au niveau de la caractérisation géométrique des assemblages flexibles par la mesure. Ainsi la problématique générale de ces travaux est la suivante :

Comment anticiper l'état géométrique d'un assemblage de composants flexibles à partir de l'évaluation par la mesure de caractéristiques géométriques et mécaniques de ces composants avant leur assemblage ?

En effet, afin de valider les performances de l'outil de simulation dans le cadre industriel présenté dans la *Section 5.2*, il est nécessaire de faire le lien entre les caractéristiques propres aux composants et à l'assemblage, au travers des domaines de la conception, de la simulation et de la mesure. Il est également nécessaire de définir des protocoles d'évaluation de ces caractéristiques par la mesure, et si possible d'en estimer les incertitudes. Il est ainsi possible de résumer ces travaux à la réponse aux sous-problématiques suivantes :

- ✈ Qu'est ce qui caractérise l'état géométrique d'un composant flexible ?
- ✈ Qu'est ce qui caractérise l'état géométrique d'un assemblage de composants flexibles ?
- ✈ Comment passer des caractéristiques des composants aux caractéristiques de l'assemblage ? En théorie ? Au travers des domaines de la conception, de la simulation et de la mesure ?
- ✈ Comment évaluer ces caractéristiques par la mesure ?
- ✈ Que vaut le résultat de simulation d'une caractéristique du produit assemblé par rapport aux données d'entrées qui sont les caractéristiques des composants ?

Les travaux de thèse menés tentent ainsi d'apporter des éléments de réponse à ces questions. Ils sont résumés dans ce manuscrit, qui s'articule de la manière suivante.

Le *Chapitre 2* aborde la notion de *grandeurs caractéristiques* au niveau d'un composant flexible, puis d'un assemblage, et fait le lien entre les deux, tout en prenant en compte la souplesse des composants. Un état de l'art sur la caractérisation des écarts géométriques au niveau du composant et de l'assemblage est réalisé, ainsi que sur la propagation de ces écarts géométriques. La représentation des éléments géométriques au sein des différents environnements du processus est alors étudiée, avec comme objectif la maîtrise de l'évolution des grandeurs associées au sein du processus industriel de simulation d'assemblage, ainsi que les contraintes que cela engendre.

Le *Chapitre 3* concerne l'*évaluation de caractéristiques de composants souples par la mesure*. Un état de l'art permet de mettre en avant différentes problématiques liées à la métrologie de composants souples. La méthode d'évaluation de caractéristiques d'un composant souple développée est ensuite exposée, et les hypothèses sur lesquelles elle repose sont détaillées. Elle est illustrée sur un exemple simple.

Le *Chapitre 4* traite de l'*évaluation de jeux dans un assemblage*. Un état de l'art présente tout d'abord les méthodes et technologies adaptées à la mesure de jeu dans un assemblage. Ensuite différentes méthodes sont étudiées, avant d'en choisir une adaptée au contexte de validation en flexible. Une simulation d'un jeu est réalisée sur un assemblage de deux composants rigides, afin d'illustrer le principe.

Le *Chapitre 5* permet la *validation expérimentale* des travaux réalisés et décrits dans les *Chapitres 3 et 4* notamment. Cette validation s'appuie sur un support expérimental conçu dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*. Plusieurs moyens sont mis en œuvre pour la validation de la méthode d'*évaluation de caractéristiques de composants souples par la mesure et la compensation des effets de l'environnement par la simulation*. Une étude de sensibilité est réalisée afin de définir un cadre de mise en œuvre de cette méthode, et d'améliorer les résultats obtenus. Enfin, la simulation et la mesure d'un jeu sont réalisées sur le support expérimental, et les résultats obtenus sont comparés.

Enfin, les conclusions concernant les différents apports de ces travaux scientifiques seront tirées, et des perspectives concernant les travaux futurs dans le domaine seront proposées.

Chapitre **2**

Grandeurs caractéristiques d'un assemblage flexible

Sommaire

1	Introduction	29
2	Caractéristiques clés d'un assemblage flexible	29
2.1	Etat de l'art	30
2.1.1	Notion de caractéristique clé	30
2.1.2	La caractéristique géométrique clé d'un assemblage de structure aéronautique composite : le jeu	31
2.1.3	Spécificités liées à la souplesse des composants	34
2.1.4	Des caractéristiques composants aux caractéristiques du produit assemblé	35
2.2	Synthèse	37
3	Caractérisation géométrique	38
3.1	Etat de l'art	38
3.1.1	Caractérisation des écarts géométriques au niveau du composant	38
3.1.2	Caractérisation du comportement mécanique du composant	40
3.1.3	Caractérisation des écarts géométriques au niveau des liaisons	41
3.2	Synthèse	42
4	Etude du processus de simulation d'assemblage flexible	43
4.1	Représentation des géométries au sein des différents environnements	43
4.1.1	Conception	44
4.1.2	Simulation	45
4.1.3	Mesure	45
4.1.4	Synthèse	46
4.2	Evaluation des écarts géométriques en vue de la simulation d'assemblage	47
4.2.1	Eléments géométriques typiques des assemblages de structures aéronautiques	47
4.2.2	Evaluation et représentation des écarts géométriques	48
4.3	Caractérisation géométrique du jeu spécifique au contexte industriel	52
5	Conclusion	55

1 Introduction

Afin d'assurer le respect d'une exigence produit, il est nécessaire de faire le lien entre cette exigence et les différents éléments qui interviennent dans la réalisation de celle-ci. Cela passe alors par l'étude des variations géométriques qui interviennent au cours du processus d'assemblage. Ces variations peuvent être dues à de nombreux phénomènes concernant le comportement des composants, le procédé de fabrication des composants, le comportement de l'assemblage ou le processus d'assemblage. La maîtrise de ces variations permet de garantir le respect de cette exigence.

Le choix d'une modélisation judicieuse de chaque phénomène est le principal garant de cette maîtrise des variations géométriques. Au niveau de chaque composant il est possible de définir des modèles qui permettent de prendre en compte les défauts géométriques et le comportement flexible. Il en est de même au niveau de l'assemblage, avec des modèles permettant de prendre en compte la propagation des écarts géométriques au sein des liaisons entre composants.

Dans le contexte industriel d'évaluation de jeu par la simulation et de validation expérimentale, les grandeurs naviguent au sein d'environnements qui nécessitent des modélisations propres à chacun. Il n'est alors pas toujours évident de faire la jonction entre ces environnements, et entre deux modélisations d'une même grandeur, tout en assurant une cohérence au niveau de l'interface.

L'objectif de ce chapitre est de définir quels sont les modèles de représentation des grandeurs les mieux adaptés au processus de validation expérimentale de la simulation de jeu au sein d'un assemblage de composants souples. Ces modèles doivent permettre aux grandeurs de transiter au sein du processus complet (simulation - mesure - comparaison), et de permettre le passage des grandeurs des composants aux grandeurs de l'assemblage.

La section 2 détaille tout d'abord la *notion de caractéristique clé*. Elle s'attarde ensuite sur la définition des grandeurs (géométriques et mécaniques) qui définissent un assemblage flexible de structure aéronautique composite, en se focalisant plus particulièrement sur la notion de jeu aux interfaces. Les spécificités liées à la souplesse des composants sont également étudiées. Elle aborde ensuite la relation entre les caractéristiques au niveau des composants et les caractéristiques au niveau de l'assemblage. Une synthèse permet enfin de mettre en évidence la nécessité de caractériser géométriquement différents éléments qui définissent le comportement d'un assemblage.

La section 3 aborde les *outils et méthodes de caractérisation* propres aux trois éléments mis en évidence dans la section 2. Il s'agit de présenter comment caractériser les écarts géométriques au niveau du composant, le comportement mécanique d'un composant ainsi que les écarts géométriques au niveau des liaisons.

La section 4 présente enfin les *contraintes de modélisation des éléments géométriques auxquels sont associées les grandeurs clés* au sein du processus de réalisation d'un produit. Une *modélisation des écarts géométriques*, adaptée au contexte industriel et compatible avec les différents domaines, est proposée. Cette modélisation est alors exposée dans le cadre de la validation expérimentale de l'outil de simulation d'assemblage développé pour le projet européen *LOCOMACHS*.

2 Caractéristiques clés d'un assemblage flexible

Les assemblages dont il est question dans ces travaux sont des assemblages de structures aéronautiques. Ces structures sont assemblées en réalisant des liaisons complètes (rivetées, boulonnées, ...) entre des composants métalliques et/ou composites souples, la rigidité relative de la structure étant donnée par l'assemblage. L'état géométrique de l'assemblage est ainsi dépendant de l'état géométrique et de l'état mécanique des composants. Les caractéristiques clés peuvent ainsi être mécaniques ou géométriques.

2.1 Etat de l'art

2.1.1 Notion de caractéristique clé

La notion de *caractéristique clé* (KC pour *Key Characteristic*) apparaît en premier dans [Boeing, 1992]. De nombreux travaux donnent ou s'appuient sur des définitions de cette notion [Whitney *et al.*, 1995] [Ardayfio, 1995] [Mantripragada et Whitney, 1998] [Adams et Whitney, 1999] [Thornton *et al.*, 2000] [Mathieu et Marguet, 2001] [Dantan *et al.*, 2008b] [Shukla *et al.*, 2013]. La plus couramment rencontrée est celle de [Thornton, 1996], qui définit une *caractéristique clé* comme « *une caractéristique du produit, un paramètre du process de fabrication, ou une caractéristique d'assemblage qui a un impact significatif sur la performance, la fonction ou la forme du produit* ». Cette notion de *caractéristique clé* est également définie dans la norme [AFNOR NF EN 9100, 2010] comme « *un attribut ou une caractéristique dont la variation a un effet significatif sur l'encombrement, l'interchangeabilité et la fonction du produit, sa performance, sa durée de vie en service, ou sa productibilité, ce qui exige des actions spécifiques pour maîtriser cette variation* ».

S'appuyant sur la définition donnée par [Thornton, 1996], [Lee et Thornton, 1996] distinguent trois classes de *caractéristiques clés*. Celles-ci, reprises par [Marguet, 2001] et utilisées sous le nom de *caractéristiques majeures*, sont les suivantes :

- ✈ Les *caractéristiques clés produit* : ce sont les « *caractéristiques associées avec les paramètres physiques et géométriques des composants ayant la répercussion la plus importante sur le respect des exigences fonctionnelles du produit* ».
- ✈ Les *caractéristiques clés d'assemblabilité* : ce sont les « *caractéristiques géométriques du produit qui seront directement associées aux procédés et au processus d'assemblage retenus pour réaliser le produit* ».
- ✈ Les *caractéristiques clés de fabrication* : ce sont les « *caractéristiques géométriques du produit qui seront directement associées aux procédés et processus de fabrication retenus pour la réalisation des composants* ».

Ainsi les *caractéristiques clés produit*, du domaine de la conception, sont des caractéristiques liées à des grandeurs physiques et géométriques. Par contre les *caractéristiques clés d'assemblabilité* et les *caractéristiques clés de fabrication*, sont des caractéristiques purement géométriques. Ainsi, lors du passage de la conception à la fabrication et à l'assemblage, les *caractéristiques clés produit* liées à des grandeurs physiques sont en quelque sorte traduites en *caractéristiques clés d'assemblabilité* et en *caractéristiques clés de fabrication* afin de pouvoir planifier leur réalisation. Ce passage, appelé *KC flowdown*, est illustré sur la Figure 2.1.

Dans le contexte aéronautique actuel, le choix des matériaux avec lesquels seront réalisés les différents composants qui constitueront le produit impose notamment une limitation des contraintes imposables, afin de garantir l'intégrité du matériau et donc du produit. Difficile toutefois d'utiliser ces *caractéristiques mécaniques* en phase de fabrication ou d'assemblage. Elles sont ainsi traduites en *caractéristiques géométriques* au niveau de la phase d'assemblage notamment. Concrètement la contrainte de cisaillement maximale admissible exprimée en phase de conception devient un ensemble de jeux maximaux admissibles lors de la phase d'assemblage, afin de garantir une non-installation de contraintes mécaniques trop importantes au sein de l'assemblage. Mais en phases de fabrication et d'assemblage, on raisonnera donc uniquement en termes de *caractéristiques géométriques*.

La traduction de l'exigence de contrainte de cisaillement maximale admissible en exigence de jeux maximaux admissibles est cependant relativement floue. En effet, d'après les industriels, les exigences exprimées au niveau des jeux maximaux admissibles sont globales, c'est à dire quelles sont les mêmes quelles que soient la position et la valeur des jeux rencontrés. Par exemple certains choisissent de caler quelle que soit la valeur du jeu, d'autres fixent une valeur à partir de laquelle il sera nécessaire de réaliser ce calage,

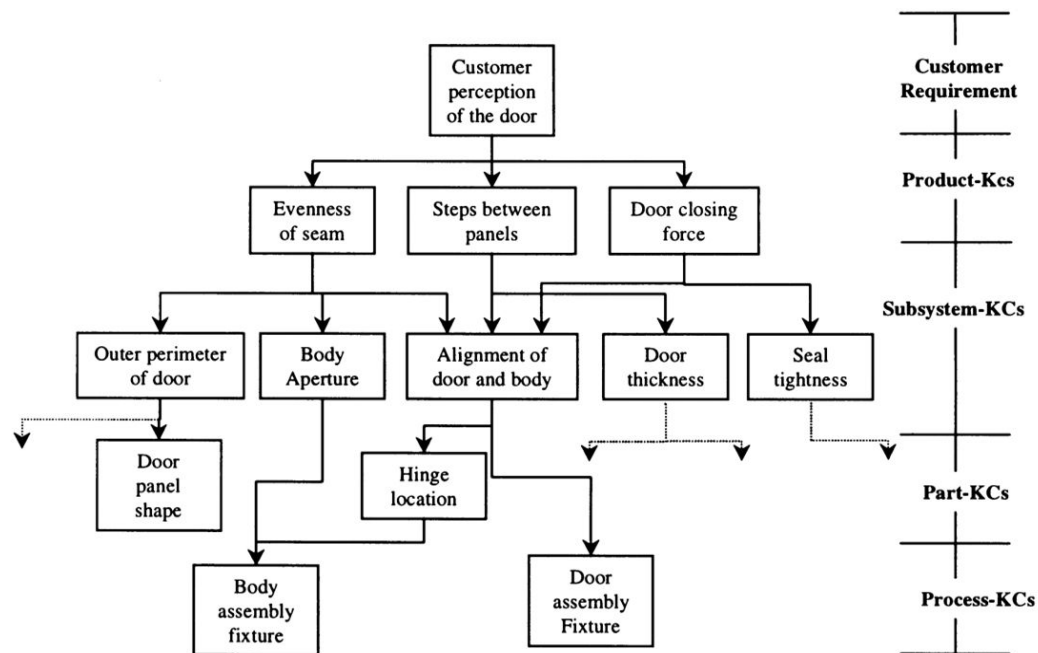


Figure 2.1 – Illustration du principe de *KC flowdown* [Thornton, 1999].

cette valeur étant identique quelle que soit la position du jeu. Cela reflète probablement la difficulté pour le *Bureau d'Etude* de faire le lien entre ces grandeurs mécaniques et géométriques. Il est cependant nécessaire pour les opérateurs de respecter les valeurs maximales admissibles de jeu lors de l'assemblage.

La notion de *caractéristique géométrique*, utilisée dans le langage de spécification *GeoSpelling*, est définie par [Ballu, 2009a]. Elle est « utilisée dans l'expression des spécifications, directement pour caractériser le défaut spécifié ou bien dans le critère d'une opération sous forme de contrainte ou d'objectif à minimiser ou maximiser ». Cette notion de *caractéristique géométrique* est illustrée sur la Figure 2.2. Il existe deux grandes familles de caractéristiques :

- Les *caractéristiques intrinsèques*, qui portent sur des éléments idéaux. Ce sont ainsi des diamètres, des angles, ...
- Les *caractéristiques de situation*, qui sont définies entre deux éléments, idéaux ou non. Elles sont basées sur des fonctions des distances des points de l'un des éléments par rapport à l'autre élément. La nature de ces fonctions dépend alors de la nature des éléments et des objectifs de modélisation.

Les *caractéristiques intrinsèques* et *de situation* entre deux éléments d'un même composant correspondent à des *caractéristiques de fabrication*. Les *caractéristiques de situation* entre deux éléments de deux composants différents correspondent à des *caractéristiques d'assemblabilité*.

La plupart de ces travaux considèrent des assemblages de composants rigides uniquement. Cependant les concepts de *caractéristiques clés*, *caractéristiques géométriques* et de *KC flowdown* sont transposables au flexible. Ce sont les modèles attachés à ces concepts qui sont différents.

2.1.2 La caractéristique géométrique clé d'un assemblage de structure aéronautique composite : le jeu

Du fait de la faible résistance des matériaux composites aux contraintes de cisaillement, qui nuisent à l'intégrité même du matériau une fois les composants assemblés, la caractéristique géométrique clé d'un assemblage de structure aéronautique composite est le jeu à l'état pré-assemblé (c'est-à-dire avant la mise en place des éléments de fixation définitifs).

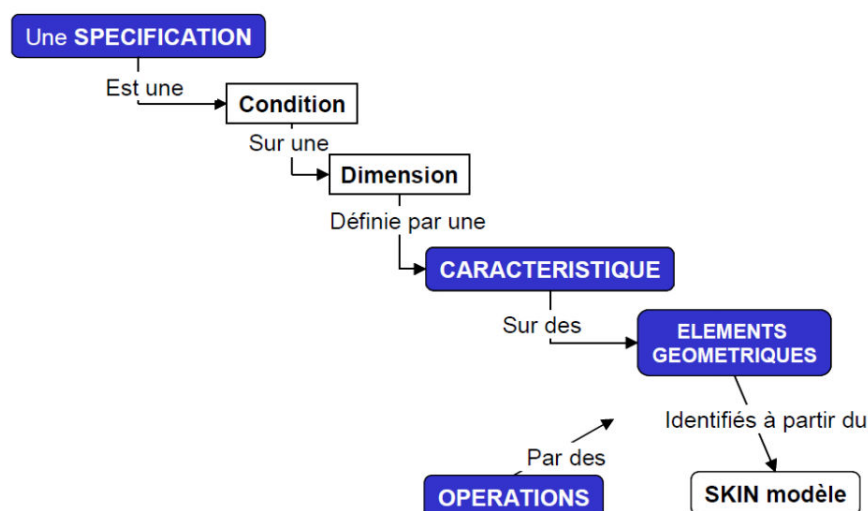


Figure 2.2 – Notion de *caractéristique géométrique* issue du langage *GeoSpelling* [Ballu, 2009a].

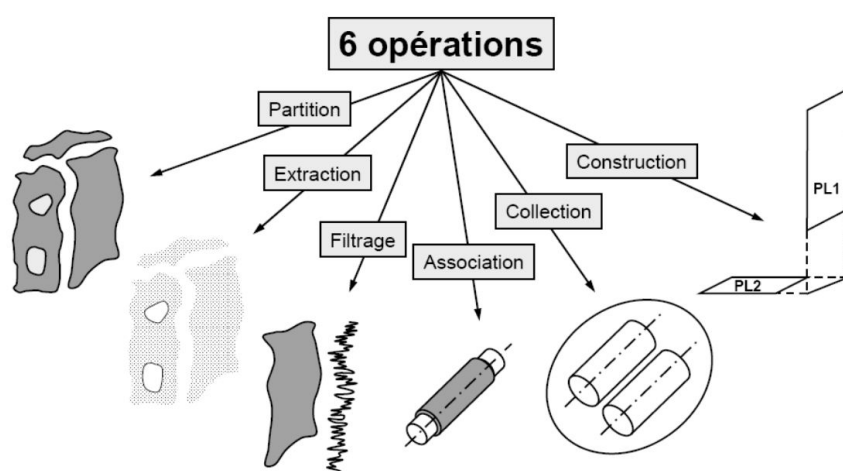
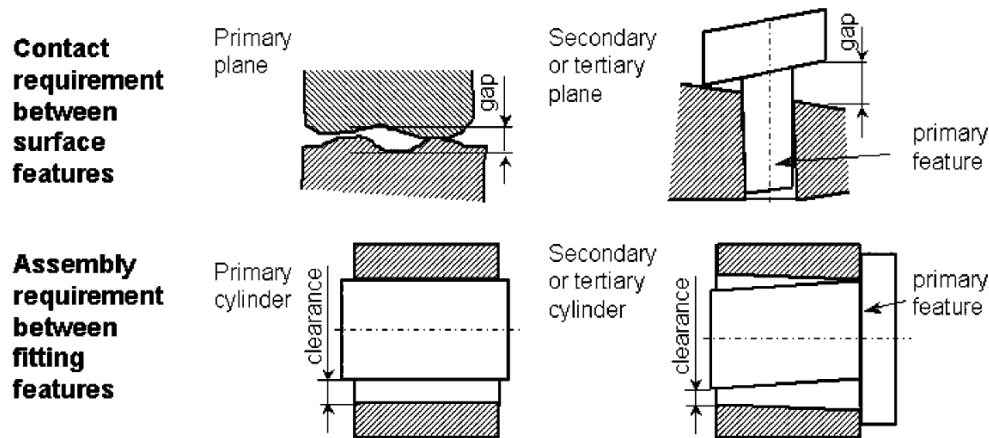
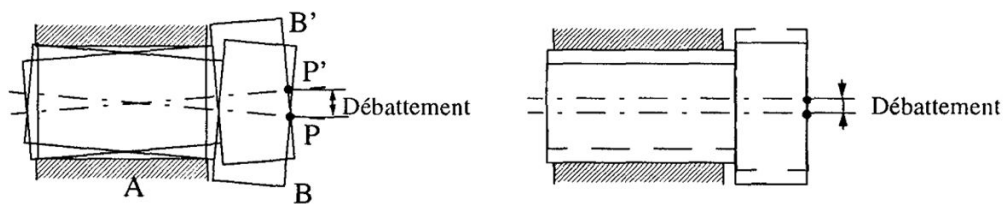


Figure 2.3 – Opérations qui permettent l'identification des éléments géométriques [Ballu, 2009a].

La notion de *jeu* est cependant relativement vague dans le langage français puisqu'elle permet de qualifier des concepts de natures différentes. On trouve par exemple dans la langue anglaise les termes *clearance*, *gap* ou encore *gap hull* qui font références à trois concepts proches, mais qui correspondent à des cas bien définis. Ainsi Anselmetti ([Anselmetti et Mawussi, 2001] [Anselmetti et Mawussi, 2003]) et Thiébaud ([Thiébaud, 2001]) ont contribué à la transcription de ces trois notions dans le langage français. Ils définissent ainsi :

- ✦ Le *jeu* (équivalent de *clearance*) : il caractérise une exigence de montabilité entre deux composants (Figure 2.4). C'est l'état virtuel au maximum de matière (donné par les enveloppes dans le cas d'une liaison primaire).
- ✦ Le *débattement* (équivalent de *gap hull*) : il représente l'amplitude du déplacement d'un point d'une pièce par rapport à une autre ou le déplacement relatif de pièces suivant une direction (Figure 2.5). Il caractérise le déplacement maximal possible en ce point entre deux composants.
- ✦ Le *gap* (équivalent de *gap*) : il est défini comme la plus grande distance locale entre deux surfaces en contact (Figure 2.4). C'est la somme des défauts de forme des surfaces (liaison primaire) ou la somme des défauts de perpendicularité par rapport aux références primaires (liaison secondaire ou tertiaire).

Figure 2.4 – Notions de *jeu* et de *gap* [Anselmetti et Mawussi, 2003].Figure 2.5 – Notion de *débattement* [Thiébaud, 2001].

Ainsi dans les travaux présentés dans ce mémoire, les assemblages étudiés étant considérés sans mobilité relative entre les composants une fois les liaisons réalisées, on considérera le jeu au sens du *gap* défini par Anselmetti.

De son côté [Samper, 2007] distingue deux manières différentes d'appréhender le jeu dans un assemblage. Il définit ainsi :

- Le *jeu résultant* : il est considéré comme le résultat de l'assemblage. Il est obtenu par une analyse de composition des écarts géométriques.
- Le *jeu spécifié* : il est considéré comme une exigence sur l'assemblage. Les écarts sont étudiés dans le but de le respecter.

Cette vision permet de distinguer le jeu garant de l'assemblabilité, qui est un pré-requis au bon déroulement de l'assemblage, du jeu conséquence de l'assemblage, qui peut alors être source de problèmes s'il n'est pas maîtrisé. A cela s'ajoute deux notions de jeu différentes :

- Le *jeu résiduel* : il apparaît lorsque nominalement le *jeu spécifié* est nul, mais que les écarts géométriques ne permettent pas de réaliser une liaison parfaite entre les composants. Il n'apparaît que lors de la phase d'assemblage, et n'est pas systématique, ce qui en fait un élément problématique.
- le *jeu de réglage* : il est inséré dès la phase de conception, et fait partie intégrante de la géométrie du produit. Il permet de réaliser un réglage afin de rattraper des écarts géométriques. Il est plus simple à prendre en compte lors de la phase d'assemblage car il est systématique. La géométrie de sa forme réelle diffère cependant de sa géométrie spécifiée.

Dans le cadre de ces travaux, ces deux types de jeux seront étudiés de façon similaire, l'objectif étant la prédiction et la mesure de leur forme réelle. Cependant on comprend bien que le *jeu résiduel* est celui qui incite fortement les industriels à vouloir améliorer les outils permettant la simulation d'assemblage.

Enfin, [Samper, 2007] considère les *défauts d'accostage* entre deux composants. Il distingue ainsi les *jeux* et (*dés*)*affleurements*, et les classe suivant six catégories visibles sur la Figure 2.6.

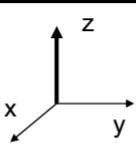
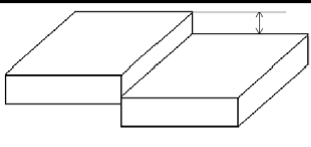
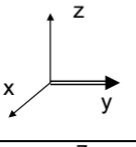
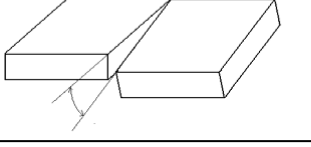
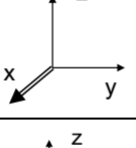
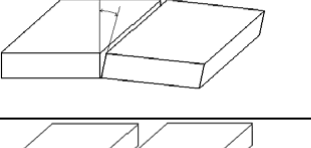
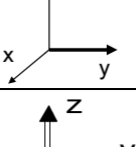
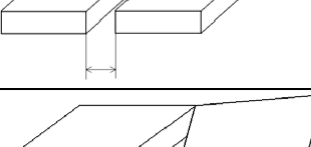
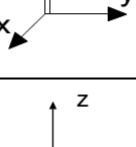
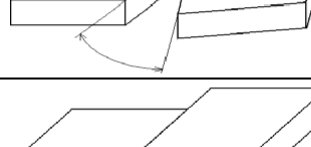
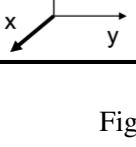
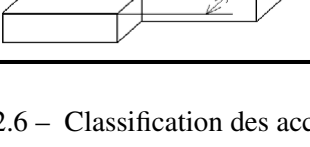
	Repère	Figure	TPD	Dénomination
Affleurements			$\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ T_z & 0 \end{Bmatrix}$	(Dés)affleurement pur
			$\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & R_y \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$	(Dés)affleurement évolutif
			$\begin{Bmatrix} 0 & R_x \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$	(Dés)affleurement tangent
Jeux			$\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ T_y & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$	Jeu pur
			$\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & R_z \end{Bmatrix}$	Jeu évolutif
			$\begin{Bmatrix} T_x & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$	Jeu tangent

Figure 2.6 – Classification des accostages [Samper, 2007].

Dans ces travaux intégrant la flexibilité et la géométrie avec défauts des composants assemblés, il sera difficile de raisonner en ces termes. Notons tout de même que les accostages étudiés seront plutôt de type (dés)affleurement tangent, jeu pur et jeu évolutif.

En résumé on considérera par la suite le jeu comme « *l'espace vide entre les éléments géométriques de deux composants assemblés* ». La caractérisation du jeu passera ainsi par la caractérisation de cet espace vide entre les composants. En rigide ou en flexible, la représentation du jeu sera donc la même.

2.1.3 Spécificités liées à la souplesse des composants

La flexibilité introduit une dimension supplémentaire, puisque la géométrie du composant n'est plus constante. Cette géométrie évolue en fonction de l'*environnement* dans lequel se trouve le composant. L'*environnement* peut être défini comme « *l'ensemble des éléments du milieu extérieur au composant* ». Certains des éléments de cet *environnement* pourront avoir un impact sur la géométrie du composant flexible. Parmi ces éléments, il y a notamment la *configuration* dans laquelle se trouve le composant. Elle se caractérise par « *l'ensemble des éléments qui permettent de contraindre le composant dans une configuration donnée* ». Il peut s'agir d'éléments en contact avec le composant, d'efforts extérieurs ou de la température.

Il en résulte un *état géométrique* propre au composant et à la *configuration* dans laquelle il se trouve. Cet *état géométrique* est donc variable. Il caractérise la géométrie du composant flexible dans une *configuration* particulière.

Les différents états géométriques du composant sont liés entre eux par l'intermédiaire du *comportement mécanique* du composant. C'est ce comportement qui permet de passer d'un *état géométrique* à un autre, en réponse aux sollicitations de l'*environnement*. Dans le cas où le modèle mécanique associé à ce comporte-

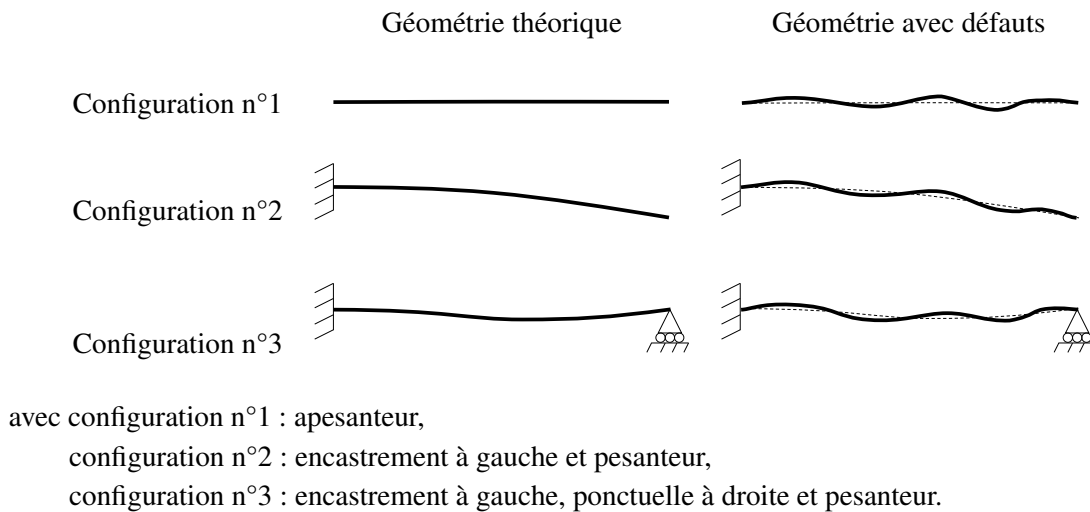


Figure 2.7 – Illustration de différents *états géométriques* d'un même composant flexible.

ment est parfait, il est possible de faire le lien entre tous les *états géométriques* du composant. La Figure 2.7, inspirée de [Cid, 2005], illustre sur un exemple simple différents *états géométriques* d'un même composant flexible. On observe la variation de géométrie liée à la modification de l'environnement. La configuration n°1 correspond à un état libre de contraintes (pas de contact avec le composant, pas de pesantueur).

Dans le cas d'une géométrie avec défauts, le principe reste le même. Le défaut géométrique reste constant, car intrinsèque à la forme réelle du composant. L'*état géométrique* du composant est cependant variable en fonction de la *configuration* dans laquelle il est placé. L'*état géométrique* est ainsi conséquence du défaut géométrique du composant et de la déformée.

En résumé, le défaut géométrique du composant reste invariant quelle que soit la *configuration* du composant. Cependant l'*état géométrique* de celui-ci est variable, en fonction de cette *configuration*. Cela veut dire que pour caractériser la géométrie d'un composant souple, il est nécessaire de caractériser à la fois l'*état géométrique* du composant et la *configuration* dans laquelle il se trouve.

Le modèle mécanique associé permet alors d'évaluer l'*état géométrique* du composant dans une *configuration*, à partir de la connaissance de l'*état géométrique* de celui-ci dans une autre *configuration*. La caractérisation des écarts géométriques nécessitant la comparaison à une référence, il est alors possible de comparer l'*état géométrique* caractérisé par rapport à un *état géométrique* de référence.

Il est important d'avoir à l'esprit que la caractérisation de la géométrie d'un composant souple se fait dans une *configuration* donnée. Elle permet de déterminer un *état géométrique* correspondant à cette *configuration*. Lors de la caractérisation il sera ainsi nécessaire de préciser l'*état géométrique* ou la *configuration* correspondante.

2.1.4 Des caractéristiques composants aux caractéristiques du produit assemblé

Le passage des caractéristiques composants aux caractéristiques du produit assemblé, tel que le jeu entre les composants, nécessite la modélisation de la relation liant ces différentes caractéristiques. Cette relation est une fonction qui caractérise la propagation des écarts géométriques au sein du produit assemblé et de la gamme d'assemblage. Sa nature repose sur les hypothèses formulées quant à la prise en compte de certains aspects de l'assemblage (défauts géométriques, séquence d'assemblage, techniques d'assemblage, ...). Cette relation est appelée *Relation de comportement de l'assemblage* par [Andolfatto, 2013].

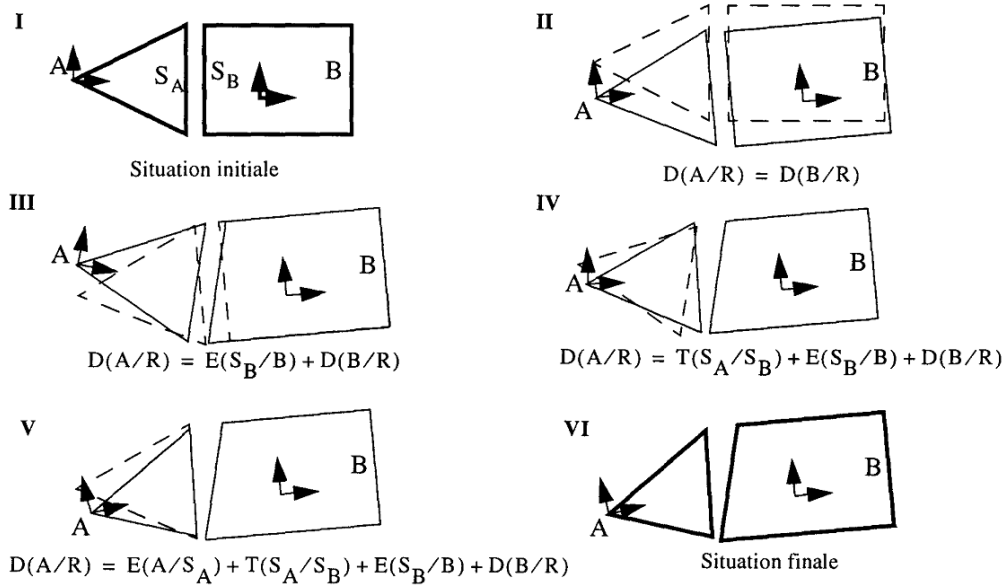


Figure 2.8 – Modélisation des écarts de liaison et de situation des éléments géométriques des composants [Thiébaud, 2001].

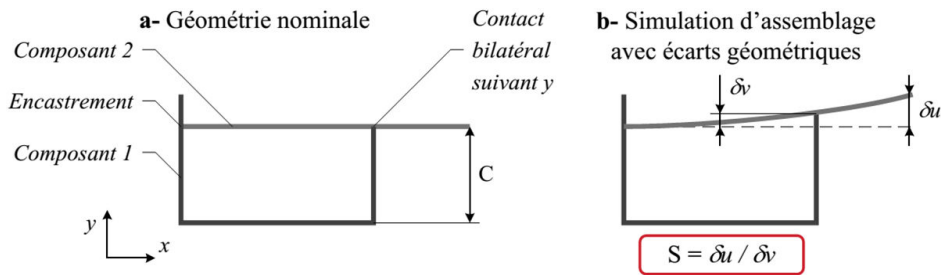


Figure 2.9 – Notion de *Matrice de sensibilité* illustrée par [Andolfatto, 2013].

En rigide, les premières méthodes permettant la définition de cette relation sont unidimensionnelles [Bourdet, 1973]. Viennent ensuite les méthodes tridimensionnelles qui s'appuient sur la notion de *Torseur des Petits Déplacements* [Ballot, 1995] [Thiébaud, 2001], qui permettent de prendre en compte les écarts de liaison et de situation des éléments géométriques des composants (Figure 2.8). L'hypothèse de rigidité ne permet cependant pas de représenter de manière suffisamment réaliste le comportement d'un assemblage hyperstatique de composants souples. Il est en effet nécessaire de relaxer des contraintes cinématiques afin de pouvoir résoudre le problème de façon approchée.

La prise en compte de la flexibilité, par l'intermédiaire de modèles *Eléments Finis*, permet de se rapprocher du comportement réel de l'assemblage. Il est alors possible d'évaluer une *Matrice de sensibilité*, qui lie les écarts géométriques au niveau du produit assemblé aux écarts géométriques des composants [Liu et al., 1996]. Cette notion est illustrée sur la Figure 2.9. La *Méthode des Coefficients d'Influence*, qui repose sur ce concept de *Matrice de sensibilité*, est étudiée dans de nombreux travaux [Merkley, 1998] [Huang et Ceglarek, 2002] [Camelio et al., 2003] [Kong et al., 2006]. Les travaux au sein du laboratoire reposent également sur cette méthode [Cid, 2005] [Breteau, 2009] [Mounaud, 2010] [Stricher, 2013]. Cette méthode ne permet cependant pas de prendre en compte les comportements non-linéaires, engendrés par les contacts unilatéraux entre les composants lors de l'assemblage.

[Stricher, 2013] met en évidence les temps de calcul importants liés à la prise en compte de ces non-linéarités (méthode de *Monte-Carlo*). Une linéarisation du problème par la *Méthode des Coefficients d'Influence* engendre un gain de temps conséquent, mais conduit à des résultats qui ne sont pas toujours fiables.

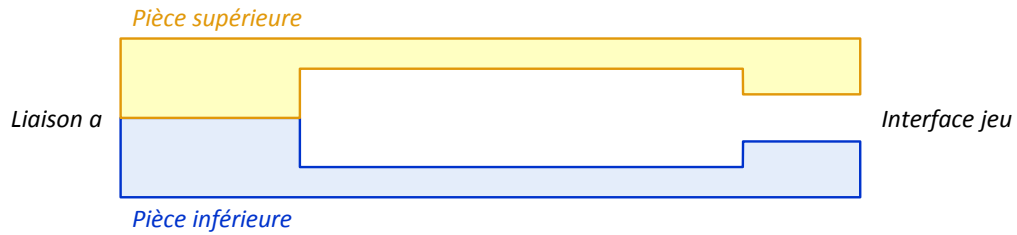


Figure 2.10 – Assemblage théorique 2D de deux composants.

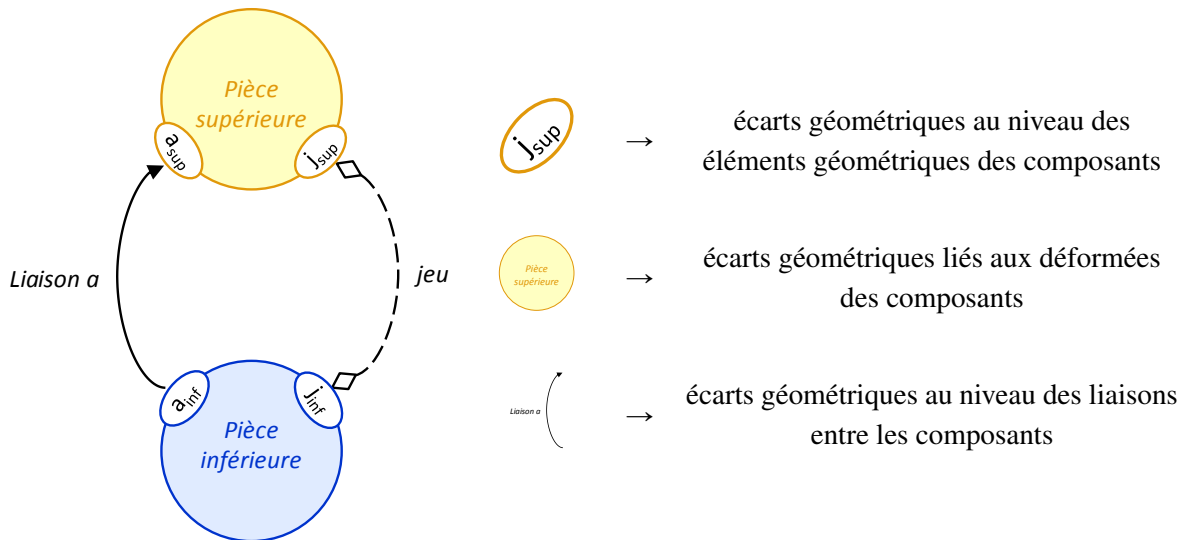


Figure 2.11 – Graphe Orienté de Contact de l'assemblage représenté en Figure 2.10.

[Andolfatto, 2013] construit un *méta-modèle* de la *Relation de comportement de l'assemblage* afin de diminuer les temps de calcul liés à l'utilisation de la méthode de *Monte-Carlo*. Des travaux sont actuellement en cours, dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*, afin de réduire le modèle de cette *Relation de comportement de l'assemblage* par la méthode de *PGD (Proper Generalized Decomposition)*.

Ces travaux insistent sur l'importance du choix des quantités d'intérêt afin de mettre en évidence certains phénomènes liés à l'assemblage. Il sera ainsi judicieux de caractériser les défauts géométriques au plus près des zones de contact afin de caractériser au mieux les jeux entre les composants.

2.2 Synthèse

Le jeu est la caractéristique géométrique clé d'un assemblage de structure aéronautique composite. Le respect des exigences qui portent sur ce jeu doit garantir la validité de l'assemblage. Il n'existe pas au niveau du composant, et apparaît seulement lorsqu'on passe au niveau de l'assemblage. Il est toutefois dépendant de la géométrie des composants assemblés, de leur comportement mécanique, et du processus d'assemblage. L'assemblage représenté sur la Figure 2.10 permet de mettre en évidence les éléments qui influent sur la géométrie du produit assemblé.

Les deux composants sont assemblés l'un sur l'autre au niveau de l'*interface a*. Le maintien en position des composants assemblés, ainsi que les défauts géométriques, ne sont pas représentés sur la figure. La géométrie du jeu au niveau de l'*interface jeu* est fonction de la géométrie des deux composants et de la façon dont ils sont assemblés. Sur la Figure 2.11 est visible le *Graphe Orienté de Contact* [Marguet, 2001] modélisant l'assemblage du produit.

Sont ainsi visibles sur ce graphe les deux composants, sur lesquels sont détaillés les différents éléments géométriques intervenant lors de l'assemblage, ainsi que les liaisons et exigences sur le produit assemblé. Il est possible de représenter la *DFC* (*Datum Flow Chain* [Mantripragada et Whitney, 1998]) correspondant à l'exigence de jeu imposée au niveau de l'*interface jeu*. Celle-ci permet de déterminer, par composition des écarts, le jeu entre les deux composants. Concrètement il est déterminé à partir de la connaissance des autres maillons de la *DFC*, qui peuvent être classés en trois catégories :

- ✚ Les écarts géométriques au niveau des éléments géométriques des composants.
- ✚ Les écarts géométriques liés aux déformées des composants, fonction notamment du comportement mécanique associé.
- ✚ Les écarts géométriques au niveau des liaisons entre les composants.

La section suivante fait ainsi l'objet d'une étude bibliographique concernant la caractérisation de ses trois types d'éléments.

3 Caractérisation géométrique

Caractériser une géométrie, c'est décrire les traits distinctifs de cette géométrie. Ainsi la caractérisation géométrique permet de donner une représentation de la géométrie concernée, cette représentation s'appuyant sur une modélisation. Différentes représentations sont donc possibles pour une même forme, fonction du modèle choisi.

Dans le contexte de la *chaîne numérique* associée à la réalisation d'un produit, les domaines de la conception et de la fabrication sont étroitement liés. Ainsi sont régulièrement confrontées des entités géométriques idéales à des entités géométriques non-idéales, les premières étant souvent utilisées comme référence. Pour cela, à la notion de *caractérisation géométrique*, est également rattachée la notion de *caractérisation des écarts géométriques*. En effet, il est très souvent question de représenter une géométrie non-idéale par rapport à un de ses idéaux, ou par rapport à une autre géométrie de référence.

Cette notion de *caractérisation géométrique* peut également être vue comme la *caractérisation à l'aide d'éléments géométriques*. Il est en effet possible de caractériser des phénomènes physiques par leur effets sur une géométrie (par exemple il est possible de caractériser une action mécanique à partir de ses effets sur un objet). Là encore cette caractérisation repose sur des modèles.

L'état de l'art suivant a pour but de recenser différents outils qui permettent de caractériser les trois éléments qui interviennent dans la composition des écarts au sein d'un assemblage flexible.

3.1 Etat de l'art

3.1.1 Caractérisation des écarts géométriques au niveau du composant

Il s'agit premièrement de représenter les écarts géométriques au niveau des éléments géométriques propres aux composants, pour un état géométrique donné. Il existe deux grandes familles de modèles pour représenter les écarts géométriques, qui sont décrites dans les travaux de [Thiébaud, 2001] :

- ✚ Les représentations *par zone enveloppe*, qui décrivent les limites entre lesquelles doit se situer l'élément géométrique du composant.
- ✚ Les représentations *variationnelles*, qui décrivent les écarts géométriques au niveau de l'élément, par rapport au nominal, grâce à un ensemble de variables.

Les représentations *par zone enveloppe* sont adaptées à la définition de conditions de montabilité par exemple. On peut citer les travaux initiateurs de [Requicha, 1983] et de [Fleming, 1988], ainsi que les méthodes basées sur les *domaines* [Giordano et Duret, 1993], les *polytopes* [Teissandier *et al.*, 1996] ou les



Figure 2.12 – Illustration du modèle nominal CAO, d'un *Skin model* continu et d'un *Skin model shape* discret [Anwer *et al.*, 2013].

T-maps [Bhide *et al.*, 2007]. Dans le contexte de ces travaux de thèse, qui visent à identifier la géométrie du jeu, ce sont les représentations *variationnelles* qui semblent cependant les mieux adaptées.

Tout d'abord des travaux traitent de la modélisation des écarts de position et d'orientation des surfaces, par rapport au nominal. Les paramètres de situation décrits dans le langage *Geospelling* [Ballu, 2009a] et dans le modèle des *SATT* (*Surfaces Associées Technologiquement et Topologiquement*) [Clément *et al.*, 1991] permettent de prendre en compte des écarts de position et d'orientation entre deux surfaces idéales. Les travaux présentés dans [Ballot, 1995] puis dans [Thiébaud, 2001] ont ensuite permis de modéliser les écarts de position et d'orientation des surfaces à l'aide de représentations torsorielles. Ces représentations sont basées sur le concept de *Torseur des Petits Déplacements*, introduit par [Bourdet et Clement, 1988]. Il n'est par contre pas possible de prendre en compte directement les écarts de forme.

La modélisation des écarts de position, d'orientation et de forme des surfaces nécessite d'autres outils. La notion de *Skin model*, issue du langage *Geospelling*, introduite par Ballu et détaillée dans [Mathieu et Ballu, 2003] et [Ballu, 2009a], permet de prendre en compte les écarts de forme des surfaces d'un composant. Il a par ailleurs fait l'objet d'une normalisation [ISO 17450-1, 2011]. Le *Skin model* d'un composant est ainsi une représentation non-idéale de la surface de celui-ci. Elle permet de représenter la géométrie d'un composant en prenant en compte les défauts géométriques. Ce concept offre ainsi une infinité de représentations possibles pour une même géométrie d'un composant.

La notion de *Skin model shape* est utilisée dans un cadre proche du notre dans [Anwer *et al.*, 2013] et [Dantan *et al.*, 2008a]. Elle est illustrée sur la Figure 2.12. C'est sur cet outil de représentation que s'appuieront les travaux présentés ici.

Le *Skin model shape* d'un composant peut être simulé. Il s'agit dans ce cas de générer, à partir d'une forme nominale, un *Skin model shape* discret avec défauts. Les écarts géométriques peuvent être générés de façon complètement aléatoire sur la surface du composant, tout en restant compris dans une zone enveloppe définie sur le nominal. Cependant cette méthode génère des défauts qui ne sont pas forcément représentatifs des défauts réels. Il est ainsi préférable de générer des écarts géométriques qui ont un sens physique, c'est-à-dire représentatifs de défauts observables dans la réalité. Les écarts géométriques sont alors liés les uns aux autres par des modèles mathématiques.

Par exemple on générera un *Skin model shape* d'une surface nominale plane en imposant un défaut global de position et d'orientation d'une certaine amplitude (défini par un *Torseur des petits déplacements*), ainsi que des écarts de forme d'une amplitude plus faible. Les valeurs de ces amplitudes reposent alors sur la connaissance et la maîtrise des procédés de fabrication des composants.

Il est également possible de générer un *Skin model shape* d'un composant à partir de la mesure. Il est intéressant de travailler avec un *Skin model shape* discret puisque les systèmes de mesure génèrent des informations discrètes. Il est éventuellement possible de remonter à un *Skin model* continu, en associant un modèle mathématique aux écarts géométriques identifiés à partir des points de mesure. A partir de la

mesure, et après traitement, il est possible d'exploiter le *Skin model shape* obtenu de façon unitaire, c'est-à-dire que celui-ci est attaché à une instance de composant. Il est également possible de générer, à partir de *Skin model shape* obtenus par la mesure de plusieurs composants, une bibliothèque de défauts typiques du couple produit-procédé-matériau. C'est notamment le cas dans les travaux de [Schleich *et al.*, 2014], où une base de défauts est obtenue par l'analyse d'un lot de *Skin model shapes* issus de la mesure. Celui-ci génère alors des *Skin model shapes* par simulation, les écarts géométriques étant alors générés suivant une loi prenant en compte la géométrie des défauts typiques mis en avant sur les pièces mesurés ainsi que leur plage de variation.

3.1.2 Caractérisation du comportement mécanique du composant

Il s'agit ici de caractériser le comportement mécanique d'un composant flexible, à partir de la connaissance de sa géométrie. En effet, les actions mécaniques extérieures (pesanteur, contact avec les autres composants, ...) ont une influence sur l'état géométrique du composant souple. Il est donc nécessaire de caractériser le comportement mécanique du composant afin de pouvoir comparer l'état géométrique dans lequel se trouve le composant à un état géométrique de référence.

Dans le cas d'un composant souple, état géométrique et état mécanique sont liés par l'intermédiaire de l'*Equation 2.1*. La Rigidité \mathbb{K} du composant qui lie ces deux états est fonction du matériau et de la géométrie du composant. Cette équation modélise le comportement mécanique élastique d'un composant souple, sous l'hypothèse de petites déformations des composants vis-à-vis de leurs dimensions. Le modèle mécanique permet ainsi de faire le lien, par l'intermédiaire de deux états mécaniques, entre les deux états géométriques correspondants.

$$F = \mathbb{K} u \quad (2.1)$$

Caractériser le modèle de comportement mécanique élastique d'un composant souple, c'est ainsi représenter les paramètres, matériaux ou géométriques, de ce modèle. On parle de caractérisation géométrique car ces paramètres sont identifiés à partir de mesures géométriques notamment, réalisées sur les composants.

Pour les assemblages relativement simple (c'est-à-dire composés de quelques composants et de géométries relativement simples), il est possible d'identifier ces paramètres par la mesure. Ce sont généralement les paramètres matériaux qui sont identifiés. De nombreuses méthodes permettent d'identifier ces paramètres, telles que la réalisation d'essais mécaniques uniaxiaux sur des éprouvettes (traction, fluage, dynamique, ...), multiaxiaux (traction biaxiale, traction-torsion, ...), de fatigue, de dureté, de rupture, d'extensométrie ou de corrélation d'image. Dans tous les cas l'objectif est de solliciter physiquement une éprouvette de manière à ce que le paramètre qu'on cherche à identifier ait un impact sur la réponse de l'éprouvette, et de mesurer une contrainte mécanique (ou un effort) et/ou une déformation géométrique (ou un déplacement) correspondants. Ces informations mesurées permettent alors d'identifier un des paramètres du modèle, où paramètres géométriques et matériaux sont dé-corrélés.

Cependant les structures aéronautiques sont faites de très nombreux composants, qui ont pour la plupart des géométries complexes. Ainsi les modèles *Eléments Finis* rattachés à chaque composant peuvent devenir très importants. Il est ainsi nécessaire de simplifier et d'idéaliser la géométrie des composants afin de garantir des temps de calcul raisonnables [Boussuge *et al.*, 2012]. Mais le comportement simulé ne correspond plus tout à fait au comportement réel (puisque la géométrie du composant intervient dans l'expression de la rigidité \mathbb{K}).

Des méthodes dites de *recalage de modèle* permettent d'ajuster, à partir de données (géométrie et mécanique) concernant le comportement réel du composant, les paramètres du modèle (contenus dans la matrice de rigidité \mathbb{K}). Il s'agit de modifier les paramètres du modèle pour que sa réponse à une sollicitation corresponde à la réponse réelle. Les nouveaux paramètres du modèle n'ont alors plus de signification

physique explicite comme celle des paramètres matériau ou géométriques. Cependant il permettent de représenter fidèlement, d'après les mesures réalisées, le comportement du composant. D'où la nécessité de définir de façon rigoureuse les éléments géométriques à mesurer afin que le modèle recalé représente le mieux possible le comportement du composant en fonction de son utilisation.

[Mottershead et Friswell, 1993] ont réalisé un état de l'art des méthodes de *recalage de modèle*, repris dans [Rosenzweig, 2011]. Toutes les méthodes détaillées visent à minimiser une fonction coût. Sont passées en revue des méthodes qui construisent des fonctions coûts basées sur les *Fonctions de Réponse en Fréquence*, sur des données modales et sur l'*Erreur en Relation de Comportement* [Ladevèze, 1983]. Cette dernière est notamment retenue, et appliquée dans les travaux de [Deraemaeker *et al.*, 2003] et [Gant *et al.*, 2011] sur des éléments de structure aéronautique.

Le recalage de modèle nécessite d'une part l'évaluation des sollicitations sur le composant, et d'autre part l'évaluation de la réponse réelle de celui-ci, afin de la comparer à la réponse simulée. La littérature n'offre pas de méthode permettant de définir les sollicitations à imposer, ni les mesures à réaliser. D'où la difficulté à définir un scénario de *recalage de modèle* performant.

Cependant la plupart des auteurs émettent des mises en garde. Ils préconisent d'une part de solliciter le composant de façon à ce que le paramètre du modèle qu'on souhaite recalé soit influent sur la réponse. Ils préconisent d'autre part de réaliser des mesures proches des sollicitations, et de multiplier le nombre de mesures. Il mettent enfin en garde contre un trop grand nombre de points de mesure, susceptible d'introduire un bruit de mesure qui nuira aux performances de la méthode de recalage de modèle.

Dans le contexte de la simulation d'assemblage de composants souples, cette étape est déterminante. En effet, on sera amené à évaluer par la mesure des caractéristiques géométriques d'un composant dans une configuration de mesure, et à simuler ces caractéristiques géométriques correspondant à l'état assemblé du composant. Le modèle mécanique conditionnera alors fortement le résultat de la simulation.

3.1.3 Caractérisation des écarts géométriques au niveau des liaisons

La troisième étape consiste à caractériser les écarts géométriques au niveau des liaisons entre les composants, pour un état géométrique donné. Les défauts géométriques des composants, ainsi que leur souplesse, font que la liaison réelle entre les deux composants est de nature différente de la liaison théorique. Ceci conduit à une mise en position différente d'un composant par rapport à l'autre, et donc à une propagation des écarts géométriques différente de celle prévue théoriquement.

Différents modèles permettent de caractériser la propagation des écarts géométriques au sein d'une liaison. Les premiers modèles apparus sont unidimensionnels, comme la méthode des *delta l* proposée par [Bourdet, 1973], qui s'appuie sur une représentation unidimensionnelle des écarts. Elle permet de propager les écarts de position des surfaces suivant une direction de référence. [Ballot, 1995] puis [Thiébaud, 2001] ont ensuite généralisé cette méthode afin de permettre la modélisation de la propagation tridimensionnelle des écarts géométriques. Le modèle, basé sur la notion de *Torseur des Petits Déplacements* [Bourdet et Clement, 1988], se limite à la propagation des écarts géométriques de position et d'orientation entre solides rigides. De manière similaire [Ayadi *et al.*, 2008] et [Anselmetti, 2012] analysent la propagation des écarts liés à la fabrication des différents éléments géométriques d'un composant au sein des différentes phases du processus de fabrication.

La prise en compte des écarts de forme sous forme *variationnelle*, et non pas en tant que *zone enveloppe*, marque une rupture. [Adragna *et al.*, 2010] sur des assemblages 2D, puis [Samper *et al.*, 2009] sur des assemblages 3D, intègrent des défauts de forme modélisés par des représentations modales. La modélisation du contact entre ces surfaces avec défauts, et donc de la propagation des écarts géométriques à travers ce contact, repose sur la notion de *surface convexe*.

[Schleich et Wartzack, 2015] réalise l'assemblage de deux *Skin model shapes* discrets. Il utilise notamment une méthode basée sur des techniques de recalage contraint. L'optimisation est réalisée sur différents éléments, comme les distances normales entre les géométries discrètes, les distances projetées ou sur le volume de l'enveloppe convexe. Le critère d'optimisation choisi influe alors sur le résultat de l'assemblage. Il montre également l'influence de la position du point d'application de l'effort lors de l'utilisation du concept de *surface convexe*.

[Grandjean, 2013] intègre également ces défauts de forme afin de déterminer la performance d'assemblages (fixe et mobile). La modélisation du contact est cette fois-ci réalisée à l'aide de la notion de *surface convexe* dans un premier temps, puis par la prise en compte de l'*érosion des aspérités de contact* (déformation locale au contact sous effort). [Moriere, 2010] prend en compte le défaut de forme à l'aide de surfaces polynômiales. La propagation des écarts se fait par résolution d'un problème d'optimisation dont les paramètres libres sont l'orientation et la position relatives des composants. Ce problème consiste en la minimisation d'une fonction objectif définissant l'ensemble des espaces jeu entre les composants, sous contrainte de non-interpénétration des composants.

3.2 Synthèse

La caractérisation géométrique d'un assemblage de composants souples nécessite l'évaluation de trois éléments :

- Les écarts géométriques au niveau des éléments géométriques des composants.
- Les écarts géométriques liés aux déformées des composants, fonction notamment du comportement mécanique associé.
- Les écarts géométriques au niveau des liaisons entre les composants.

Dans tous les cas l'objectif est de caractériser les écarts géométriques par rapport à une référence. Dans le cas d'un assemblage de composants rigides, la référence est souvent la géométrie théorique du produit assemblé (qui correspond au modèle CAO), géométrie qui est invariante. Dans ce cas il s'agira d'exprimer les écarts géométriques au niveau des éléments géométriques d'un composant par rapport à la géométrie théorique contrainte de ce composant. De même les écarts géométriques au niveau des liaisons seront exprimés par rapport à la position théorique des liaisons. La composition de ces écarts géométriques permettra alors de déterminer l'état géométrique de l'assemblage.

Lorsqu'on introduit la souplesse des composants, le principe reste le même. Toutefois la géométrie de référence peut changer puisque la géométrie des composants est variable. Ainsi les écarts géométriques seront exprimés par rapport à des géométries théoriques contraintes, qui seront différentes en fonction de l'état mécanique de l'assemblage. Toutefois, en supposant le modèle mécanique parfait, il sera possible d'exprimer les écarts géométriques entre chacune de ces géométries théoriques contraintes. Il s'agit alors d'ajouter un maillon dans la chaîne de composition des écarts géométriques pour exprimer les écarts géométriques entre deux éléments géométriques d'un même composant.

Le concept de *champ d'écarts* peut ainsi être utilisé pour décrire ces trois types d'écarts géométriques. Il permet effectivement de représenter les écarts géométriques au niveau des éléments géométriques des composants, au niveau des liaisons entre les composants et entre les déformées correspondant à deux états géométriques différents. De plus il est possible de composer les *champs d'écarts* représentatifs des différents maillons, ce qui permet de passer des caractéristiques des composants aux caractéristiques du produit assemblé.

Reste à savoir comment sont évalués les différents écarts géométriques dans le contexte de simulation d'assemblage en vue du calage, et comment les représenter afin de permettre la composition de ces écarts.

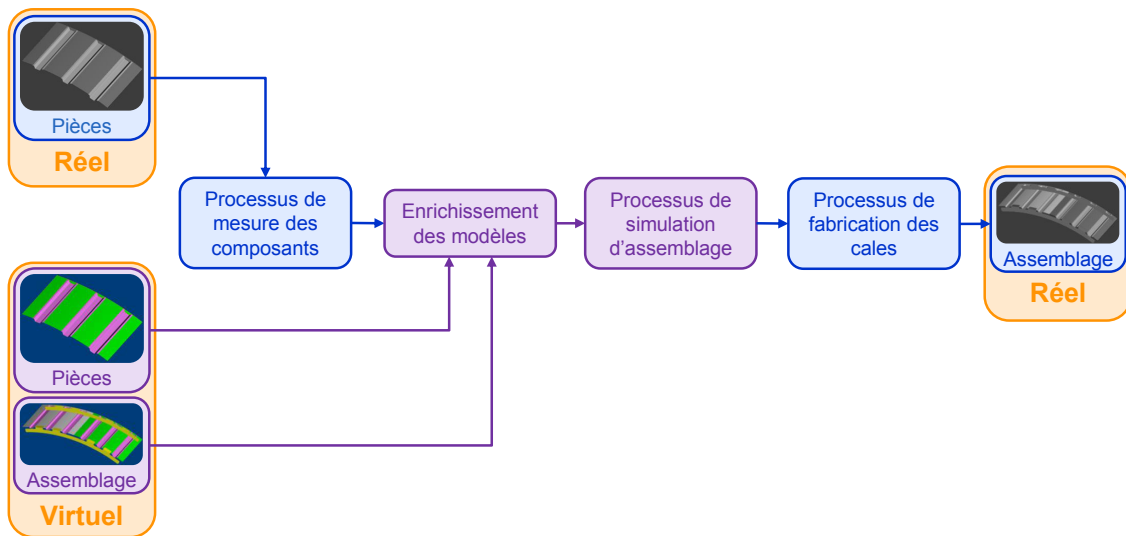


Figure 2.13 – Processus d'assemblage envisagé [LOCOMACHS, 2012].

4 Etude du processus de simulation d'assemblage flexible

Au sein du processus classique de réalisation d'un produit transitent les grandeurs qui caractérisent celui-ci. Ces grandeurs évoluent le long de la *chaîne numérique*, suivant les hypothèses de modélisation qui sont posées. Notamment elles sont définies sur des éléments géométriques idéaux au stade de la conception, alors que ces éléments deviennent non-idéaux au niveau du produit fini, du fait des procédés de fabrication et d'assemblage notamment. Il est ainsi nécessaire de définir les modèles de représentation de ces grandeurs et des éléments géométriques associés les plus adaptés à chaque stade du processus, tout en garantissant un échange des données correct entre chaque domaine.

De plus en plus la notion de géométrie non-idéale est prise en compte en amont du processus de réalisation du produit. Cela n'implique cependant pas que les modèles de représentation des grandeurs qui y sont attachées soient les mêmes dans les différentes phases. L'idéal serait bien sûr un modèle de représentation unique. La rupture de continuité au sein de la *chaîne numérique* rend cependant cette idée difficilement envisageable dans le contexte actuel. Cela rend la gestion des variations géométriques tout au long du processus plus difficile. D'où la nécessité de définir clairement l'évolution des grandeurs au sein du processus, et l'évolution de leurs représentations, afin de maîtriser au mieux ces variations.

L'étude du processus complet de réalisation d'un avion n'est pas envisageable. Dans le cadre de ces travaux de thèse, c'est le processus de simulation d'assemblage et d'évaluation de jeu en vue du calage qui sera étudié plus particulièrement. L'étude de l'évolution des grandeurs caractéristiques sera réalisée dans ce cadre précis.

4.1 Représentation des géométries au sein des différents environnements

Dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*, l'un des objectifs est de remplacer les opérations de pré-assemblage et de mesure de jeu par une opération de simulation de jeu à partir de données issues de la mesure des composants. Le processus visé est résumé sur la *Figure 2.13*. Il s'agit en effet de mesurer les composants avant l'assemblage et d'intégrer ces données aux modèles *Eléments Finis* qui permettront la simulation d'assemblage (intégration des défauts géométriques et recalage des paramètres du modèle). La simulation d'assemblage est ensuite réalisée afin de déterminer la géométrie des cales à fabriquer pour réaliser un assemblage définitif qui respecte les exigences.

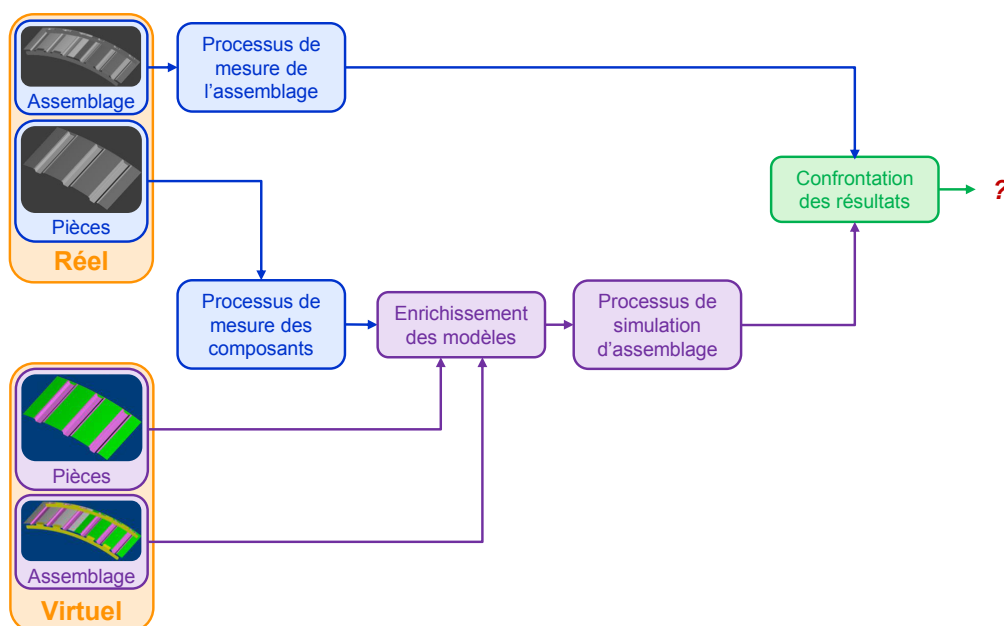


Figure 2.14 – Processus de validation de la simulation d'assemblage [LOCOMACHS, 2012].

Dans le cadre de ces travaux de thèse, l'objectif est de valider les modèles de simulation d'assemblage retenus, comme résumé sur la Figure 2.14. L'assemblage réel est cette fois-ci une donnée d'entrée. La validation consiste alors à comparer les assemblages réel et simulé, notamment au niveau de la forme des jeux.

Le processus faisant intervenir les domaines de la conception, de la mesure et de la simulation, il est nécessaire de définir comment vont transiter les grandeurs au cours de celui-ci. Les modes de représentation devront permettre ce transit au sein de différents domaines, et garantir la continuité de l'information.

4.1.1 Conception

Dans le domaine de la conception, la géométrie des composants est généralement considérée comme idéale. Sous un environnement CAO virtuel, cette géométrie est représentée par la maquette numérique. Les entités géométriques des composants sont parfaites. La souplesse n'est pas considérée, c'est-à-dire que chaque entité géométrique a une géométrie invariante. Cette géométrie correspond généralement à la géométrie théorique contrainte du produit assemblé. La situation entre ces entités géométriques est également invariante. Chaque entité géométrique est définie mathématiquement, au sens géométrique et topologique.

Au stade de la conception il est toutefois possible de considérer les défauts géométriques des composants. Pour cela deux familles de méthodes sont employées, qui permettent de prendre en compte ces défauts à l'aide d'une représentation *par zone enveloppe* ou d'une représentation *variationnelle*. Dans le premier cas il s'agit de définir autour de la géométrie nominale une frontière dans laquelle la géométrie avec défauts peut évoluer. Dans le second cas il s'agit de définir à l'aide de variables la géométrie de l'élément géométrique avec défauts. Cette deuxième méthode peut conduire à une définition mathématique classique de la géométrie, auquel cas celle-ci sera continue. Elle pourra également conduire à une définition discrète de celle-ci. On considérera que les représentations discrètes concernent plutôt le domaine de la simulation, même si la frontière est difficile à établir. Les mêmes méthodes notamment permettent de modéliser les écarts de situation entre deux éléments géométriques.

Généralement la géométrie définie au stade de la conception est considérée comme la géométrie de référence tout au long du processus de réalisation du produit. Cela semble moins évident lorsqu'on considère

la souplesse des composants. Ainsi les écarts géométriques liés aux déformées des composants seront exprimés par rapport à cette géométrie de référence. Les écarts géométriques représentatifs du défaut de forme seront exprimés par rapport à la déformée correspondant à l'état géométrique du composant.

4.1.2 Simulation

Le domaine de la simulation est très proche du domaine de la conception. Souvent la simulation est considérée comme une opération de conception à part entière. Dans ces travaux le choix a été fait de considérer la simulation par *Eléments Finis* à part. On considèrera que le domaine de la simulation permet de prendre en compte le comportement flexible des composants, contrairement à celui de la conception.

Les géométries définies dans le domaine de la simulation dérivent des géométries nominales. Ces géométries nominales sont discrétisées à l'aide d'*Eléments Finis*, après idéalisation et simplification. Ces deux opérations, qui permettent de passer de la géométrie du modèle CAO à une géométrie optimisée pour le calcul *Eléments Finis*, seront détaillées par la suite. Dans le contexte, on supposera les erreurs liées à la discrétisation négligeables. Géométriquement parlant, seule l'information présente au noeud d'un maillage *Eléments Finis* a un sens. Les éléments ont pour but d'assurer le lien entre les noeuds sous les contraintes des modèles de mécanique employés. Cette représentation discrète possède moins d'information que la géométrie nominale, cependant elle permet de pouvoir prendre en compte la souplesse des composants. En effet, les noeuds du maillage, qui peuvent évoluer géométriquement sous sollicitations suivant les modèles mécaniques posés, permettent de représenter la géométrie à caractère variable d'une pièce souple.

Avec une représentation de type maillage, il est également possible de représenter la géométrie avec défauts d'un composant. il s'agit alors de définir un *Skin model shape* (discret par définition), représentation variationnelle des défauts géométriques. La définition de cette représentation repose alors principalement sur le retour d'expérience (défauts typiques identifiés notamment).

La simulation d'assemblage consiste alors, à partir de modèles représentatifs de la géométrie et du comportement mécanique des composants à assembler, du produit assemblé et du processus d'assemblage, de déterminer l'état géométrique du produit assemblé. Cela passe par une modélisation du produit (liaisons entre les composants et lien avec les éléments géométriques des composants), de la géométrie des composants (discrétisation de la géométrie nominale et intégration de données de mesure réalisées sur les composants), du comportement mécanique (recalage de modèle) et du processus d'assemblage (définition de la gamme d'assemblage).

4.1.3 Mesure

Le domaine de la mesure touche cette fois-ci au réel. Il s'agit de réaliser l'acquisition d'une forme réelle afin d'en donner une représentation virtuelle. Dans le contexte de ces travaux de thèse la géométrie de la forme réelle est considérée comme variable (du fait de la souplesse des composants) et avec défauts géométriques. Par nature la peau de la pièce réelle est continue. Le résultat brut de la mesure par coordonnées est quant à lui discret. Une géométrie mesurée est ainsi représentée par un ensemble de points, plus ou moins dense selon le système de mesure utilisé. Dans le langage *Geospeeling* il s'agit de réaliser une opération d'*extraction*, par la mesure, d'un nombre fini de points.

Contrairement à l'opération de discrétisation, l'opération de mesure engendre des écarts entre la géométrie de la forme réelle et la géométrie mesurée. Ces écarts, complexes à déterminer, sont regroupés sous le terme d'*incertitude de mesure*. Ils sont soumis à de nombreux paramètres, plus ou moins influents. Principalement les systèmes de mesure ainsi que les conditions de mesure influent sur la valeur de ces écarts. L'évaluation de cette incertitude de mesure repose souvent sur la redondance des mesures et sur des hypothèses de modélisation.




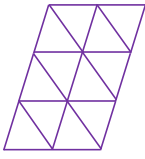
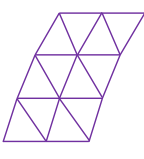
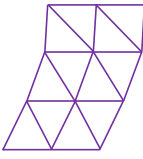




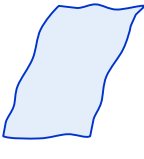

	Etat géométrique n°1	Etat géométrique n°2	Etat géométrique n°3
Conception	 <i>Géométrie théorique contrainte</i>		
Simulation	 <i>Géométrie théorique contrainte maillée</i>	 <i>Géométrie théorique contrainte simulée (2)</i>	 <i>Géométrie théorique contrainte simulée (3)</i>
Mesure		 <i>Nuage de points mesurés (2)</i>	 <i>Nuage de points mesurés (3)</i>
Réel		 <i>Skin model représentatif du réel (2)</i>	 <i>Skin model représentatif du réel (3)</i>

Tableau 2.1 – Synthèse des représentations des géométries manipulées.

La densité de la représentation dépend également du système de mesure utilisé. Ainsi par exemple les palpeurs à contact permettent d'acquérir relativement peu de points mais garantissent une incertitude de mesure relativement faible. De plus en plus utilisés, les système de mesure optiques sans contact permettent d'acquérir énormément de points, avec toutefois une incertitude plus importante.

4.1.4 Synthèse

Le *Tableau 2.1* permet de faire la synthèse des notions évoquées dans les sections précédentes. Il distingue notamment les trois environnement décrits précédemment, auquel s'ajoute l'environnement réel, afin d'illustrer les différentes représentations abordées. Il distingue également différents état géométriques d'un même composant souple.

L'état n°1 représente l'état assemblé du produit. Souvent c'est cette géométrie qui est considérée comme la référence, et qui sert de point de départ au tolérancement notamment. Les maillages *Eléments Finis* découlent de la représentation de cet état géométrique. Dans le contexte on considérera qu'il n'est pas possible d'avoir accès à la géométrie de la forme réelle correspondant à cet état géométrique, puisqu'elle correspond à la géométrie du produit assemblé.

Les états n°2 et n°3 représentent des états géométriques particuliers du composant. Il pourrait s'agir par exemple de l'état géométrique correspondant à une opération de mesure, ou de l'état géométrique correspondant à une opération de pré-assemblage. Il est possible d'avoir accès à la géométrie du composant en configuration de mesure. Il n'est pas forcément possible d'avoir accès à la géométrie du composant en configuration de pré-assemblage.



Figure 2.15 – Exemple de structure aéronautique.

Il est possible de naviguer, au sein d'un état géométrique, entre les différents domaines (au moins dans un sens, par exemple du réel vers la mesure ou de la conception vers la simulation). Le domaine de la simulation représente une passerelle entre les différents états géométriques (sous réserve que le modèle mécanique soit parfait et que la configuration du composant soit connue). La simulation permet de naviguer dans le sens horizontal, donc entre les différents états géométriques.

Ainsi le passage de l'état géométrique n°1 à l'état géométrique n°2 est envisageable. Il offre par exemple la possibilité d'enrichir le processus de simulation à partir de la mesure dans l'état géométrique n°2. En effet, s'il est possible de faire le lien entre les points de mesure et le maillage déformé, alors il est envisageable de déterminer ce que seraient ces points de mesure dans l'état géométrique n°1. De même pour l'état géométrique n°3.

Il est même envisageable de simuler, à partir des données de mesure de l'état géométrique n°2, ce que seraient ces points de mesure dans l'état géométrique n°3. Il est alors possible de transformer les données de mesure acquises dans l'état géométrique correspondant à la configuration de mesure, afin qu'elles correspondent à l'état géométrique dans lequel se trouverait le composant pré-assemblé (état géométrique n'étant pas forcément mesurable).

Une fois qu'on possède une représentation de la géométrie dans une configuration, on en a potentiellement une image dans toutes les configurations, tant que le modèle mécanique utilisé pour la simulation est parfait. Dans le cas où il ne l'est pas, la comparaison entre une mesure réalisée dans l'état géométrique n°3, et une simulation de ce que deviendrait une mesure réalisée dans l'état géométrique n°2 dans l'état géométrique n°3, peut participer à son amélioration.

Il reste alors à assurer l'évaluation des écarts géométriques entre les mesures et le maillage correspondant à un même état géométrique. Il en est de même entre deux déformées correspondant à deux états géométriques différents.

4.2 Evaluation des écarts géométriques en vue de la simulation d'assemblage

4.2.1 Eléments géométriques typiques des assemblages de structures aéronautiques

Les assemblages de structures aéronautiques, composés de très nombreuses pièces, nécessitent la réalisation de milliers de liaisons entre ces composants. Ces liaisons présentent cependant des caractéristiques similaires. Sur la *Figure 2.15* est visible un assemblage de structure aéronautique classique. La liaison globale type entre deux composants d'un assemblage de structure de type aéronautique peut être vue comme la combinaison des liaisons élémentaires suivantes :

- ✦ Liaison imposant un contact surface - surface. Du fait de la faible courbure des composants, il est possible de la rapprocher d'une liaison plane puisqu'on considérera qu'elle bloque trois degrés de liberté.

	Liaisons élémentaires	Caractéristiques des éléments géométriques des composants assemblés
Liaison globale type	Liaison imposant un contact surface - surface	Forme (de chaque surface)
		Contour (de chaque surface)
		Position (relative entre surfaces)
		Orientation (relative entre surfaces)
	Liaison imposant une coïncidence axe - axe	Forme (de chaque cylindre)
		Diamètre (de chaque cylindre) - Taille
		Position (relative entre axes)
		Orientation (relative entre axes)
	Liaison imposant une coïncidence axe - plan médian	Forme (du cylindre et de la rainure)
		Diamètre (du cylindre) et largeur (de la rainure) - Taille
		Position (relative entre l'axe et le plan médian)
		Orientation (relative entre l'axe et le plan médian)

Tableau 2.2 – Caractéristiques des éléments géométriques intervenant dans une liaison type.

- Liaison imposant une coïncidence entre les axes de deux cylindres. Elle bloque deux degrés de libertés supplémentaires.
- Liaison imposant une coïncidence entre l'axe d'un cylindre et le plan médian d'une rainure. Elle bloque le dernier degré de liberté.

Ces liaisons élémentaires, ou liaisons de positionnement, réalisent les liaisons globales entre les composants. Les éléments géométriques qui interviennent au niveau des composants sont donc des surfaces, légèrement courbes, et des cylindres. Pris indépendamment des autres, un élément géométrique peut être caractérisé par : sa forme et son contour pour une surface, sa forme et son diamètre intrinsèque pour un cylindre. Lorsqu'on les prend par paire afin de réaliser une liaison élémentaire imposant un contact surface - surface, la position et l'orientation relative des surfaces est à prendre en compte. Idem lorsqu'on s'intéresse aux autres liaisons élémentaires. Les caractéristiques propres aux différents éléments géométriques énoncés sont regroupées dans le *Tableau 2.2*. La *position* et l'*orientation* caractérisent la situation entre deux éléments géométriques du même type, les autres sont propres à un élément géométrique pris seul.

On considérera par la suite que la forme des cylindres et des trous oblongs permettant le passage des éléments de maintien en position, ainsi que leurs dimensions, n'ont pas d'influence significative sur le comportement de l'assemblage. En effet, ces défauts sont rattrapés par la mise en place des éléments de maintien en position tels que les rivets ou les boulons. Concernant les cylindres permettant de positionner les composants, on fera la même hypothèse. Il s'agira ainsi de définir la position de ces trous. Du fait de la faible épaisseur des composants, les variations d'orientation des axes et plans médians de ces éléments géométriques seront également négligées. Ainsi seule la position des éléments de substitution, par rapport à la surface réalisant la liaison primaire, nécessitera une détermination afin de caractériser ces éléments.

Cette idéalisation de la géométrie est couramment utilisée dans le cadre de la simulation d'assemblage. En effet, à ce stade les trous n'existent pas au niveau des modèles *CAO* et *Eléments Finis*. Cependant leur position est définie, afin de permettre la définition des liaisons de positionnement et d'attachement. Elle correspond alors à la position d'un noeud du maillage, ou d'un noeud virtuel projeté sur celui-ci.

4.2.2 Evaluation et représentation des écarts géométriques

La simulation numérique par *Eléments Finis* nécessite une discrétisation préliminaire de la géométrie nominale des composants. Dans le cadre de la simulation de jeu en vue du calage, cette discrétisation est

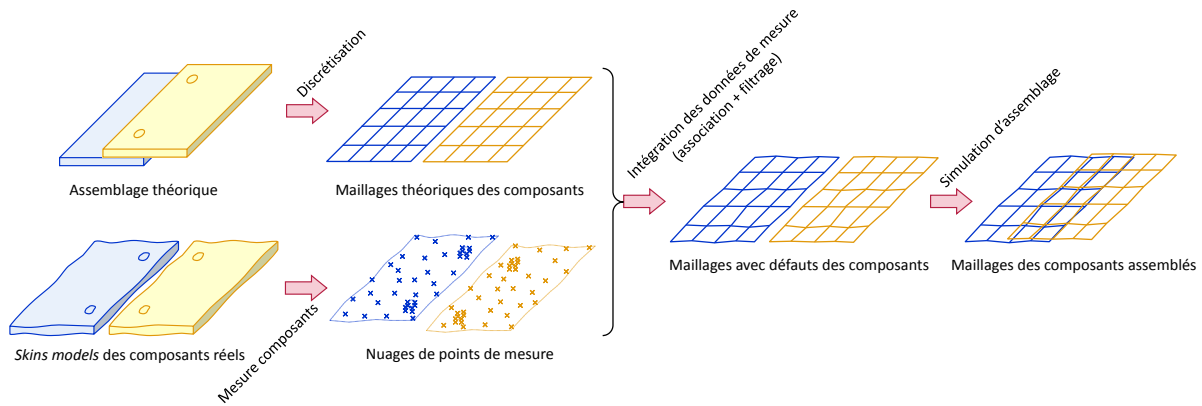


Figure 2.16 – Evolution de la représentation des éléments géométriques au cours du processus de simulation.

fonction d'une part de la géométrie des composants à modéliser, et d'autre part de la finesse du résultat attendu. Cette finesse de représentation dépend alors des défauts géométriques qu'on souhaite pouvoir représenter et des limites liées au procédé de réalisation des cales. Cet aspect sera abordé dans le *Chapitre 3*. La finesse de représentation aura également une influence sur les temps de calcul.

Le schéma visible sur la *Figure 2.16* illustre l'évolution de la représentation des éléments géométriques au cours du processus de simulation d'assemblage. D'une part la géométrie nominale des composants de l'assemblage est discrétisée (après idéalisation et simplification) afin de générer les maillages nominaux des composants. D'autre part les éléments géométriques des composants qui ont un intérêt vis-à-vis des objectifs de la simulation sont mesurés sur les composants réels. En résultent des ensembles de points caractérisant chacun de ces éléments géométriques. Les données de mesure sont ensuite intégrées aux maillages nominaux. Dans le cadre de l'utilisation de systèmes de mesure sans contact permettant de fournir un grand nombre de points de mesure, il s'agit de réaliser un filtrage afin de déplacer les noeuds du maillage en fonction des données de mesure. Cela permet d'intégrer les données de mesure dans la simulation, tout en conservant un maillage *Eléments Finis* de qualité. Cette procédure sera étudiée en détail au *Chapitre 3*. Les maillages avec défauts des composants permettent alors de réaliser la simulation d'assemblage.

Les écarts géométriques identifiés par la mesure sont introduits au niveau des maillages *Eléments Finis* nominaux des composants. En ce qui concerne les écarts de forme d'une surface, ils peuvent être représentés de manière discrète par un champ d'écarts. Celui-ci est défini par les trois éléments suivants, résumés par l'*Equation 2.2* :

- ✈ Un ensemble de *points d'applications* : il s'agit dans ce cas des noeuds du maillage nominal, définis chacun par trois coordonnées. La discrétisation initiale permet ainsi de fixer la densité du champ d'écarts. Le champ d'écart peut être partiel dans l'optique de la représentation ($\dim(champ) < N_{Noeuds}$). Il doit cependant être défini en chaque noeud pour pouvoir réaliser une simulation cohérente.
- ✈ Un ensemble de *directions* : une direction est définie en chaque point d'application du champ d'écarts par ses trois composantes. Cette direction peut être différente d'un point à l'autre. Dans le cadre de la représentation d'écarts géométriques, la direction est imposée par une référence.
- ✈ Un ensemble d'*amplitudes* : il s'agit d'un vecteur de dimension le nombre de points d'applications. Il représente, en chaque noeud, la valeur de l'écart entre le point d'application et la terminaison. La valeur de cet écart peut être négative, auquel cas il s'agira d'une variation géométrique *intérieure matière*. Une variation géométrique *hors matière* sera représentée par un écart positif.

$$\begin{aligned}
 \text{Champ d'écarts} &\longrightarrow \text{Points d'application} \quad \left\{ \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_N & Y_N & Z_N \end{bmatrix}}^3 \end{array} \right\} N_{\text{Noeuds}} \\
 &\longrightarrow \text{Direction}(s) \quad \left\{ \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} U_1 & V_1 & W_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ U_N & V_N & W_N \end{bmatrix}}^3 \end{array} \right\} N_{\text{Noeuds}} \\
 &\longrightarrow \text{Amplitudes} \quad \left\{ \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} D_1 \\ \vdots \\ D_N \end{bmatrix}}^1 \end{array} \right\} N_{\text{Noeuds}}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Un champ d'écarts permet de représenter dans le cas présent les écarts géométriques entre deux géométries discrètes. Dans ce cas la densité du champ est définie par la densité de la géométrie de référence.

Cette géométrie de référence impose également la direction d'évaluation des écarts. Dans le cas de l'évaluation des écarts géométriques, pour un même état géométrique, entre un nuage de points issu de la mesure et un maillage déformé, la référence choisie est le maillage déformé. Les normales aux noeuds sont choisies comme directions du champ d'écarts, ces normales étant définies en un noeud comme la moyenne des normales aux éléments qui se partagent ce noeud, pondérées par l'aire des éléments (cette hypothèse étant valable sur des surfaces continues et sans arêtes). Dans le cas de l'évaluation des écarts géométriques entre deux maillages correspondant à deux états géométriques différents, il s'agira de choisir l'une ou l'autre des géométries comme référence.

S'il est possible de faire l'hypothèse de petites déformées et de petits défauts géométriques vis à vis des dimensions des composants, le problème peut être simplifié. Dans ce cas il s'agit de n'utiliser qu'une seule géométrie de référence pour l'expression des écarts géométriques, la géométrie théorique contrainte correspondant au modèle CAO. Cela offre l'avantage d'utiliser les mêmes directions pour l'expression des champs d'écarts. Il est toutefois nécessaire de vérifier la validité de cette hypothèse en fonction du cas étudié. La *Figure 2.17* illustre la représentation de la forme d'une poutre souple avec défauts, par rapport à la géométrie théorique contrainte de cette poutre, par composition des champs d'écarts.

Les écarts géométriques au niveau des liaisons, c'est à dire entre les éléments géométriques de deux composants différents, sont représentés de la même manière. Les champs d'écarts entre les nuages de points issus de la mesure et les géométries de référence ayant été évaluées, il s'agit d'évaluer le champ d'écarts représentatif de la situation des géométries de référence l'une par rapport à l'autre. Dans ce cas le passage par la géométrie théorique de l'assemblage (géométrie théorique contrainte) permet d'utiliser la position de la liaison théorique comme référence. La *Figure 2.18* illustre la composition des champs d'écarts permettant la représentation des écarts entre deux éléments géométriques non-idéaux de deux composants assemblés.

Concernant les trous, les écarts de forme et d'orientation sont considérés comme négligeables du fait de la faible épaisseur des composants et de leur rôle dans l'assemblage du produit. Ce sont principalement les écarts géométriques concernant la position de ces trous qui vont être transmis au niveau de la liaison. Ces écarts sont définis perpendiculairement à la normale à la géométrie de l'élément en surface du trou en question. Ils sont définis par une direction (perpendiculaire à la normale à la référence) et une amplitude.

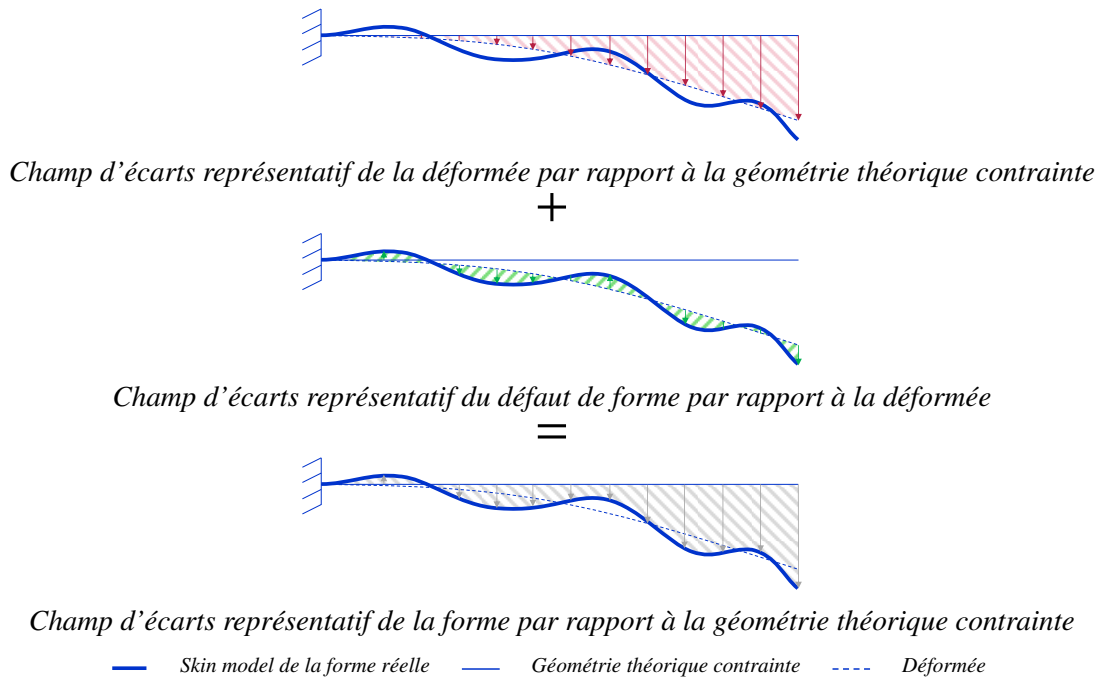


Figure 2.17 – Composition des différents champs d'écarts mentionnés au niveau d'un composant souple.

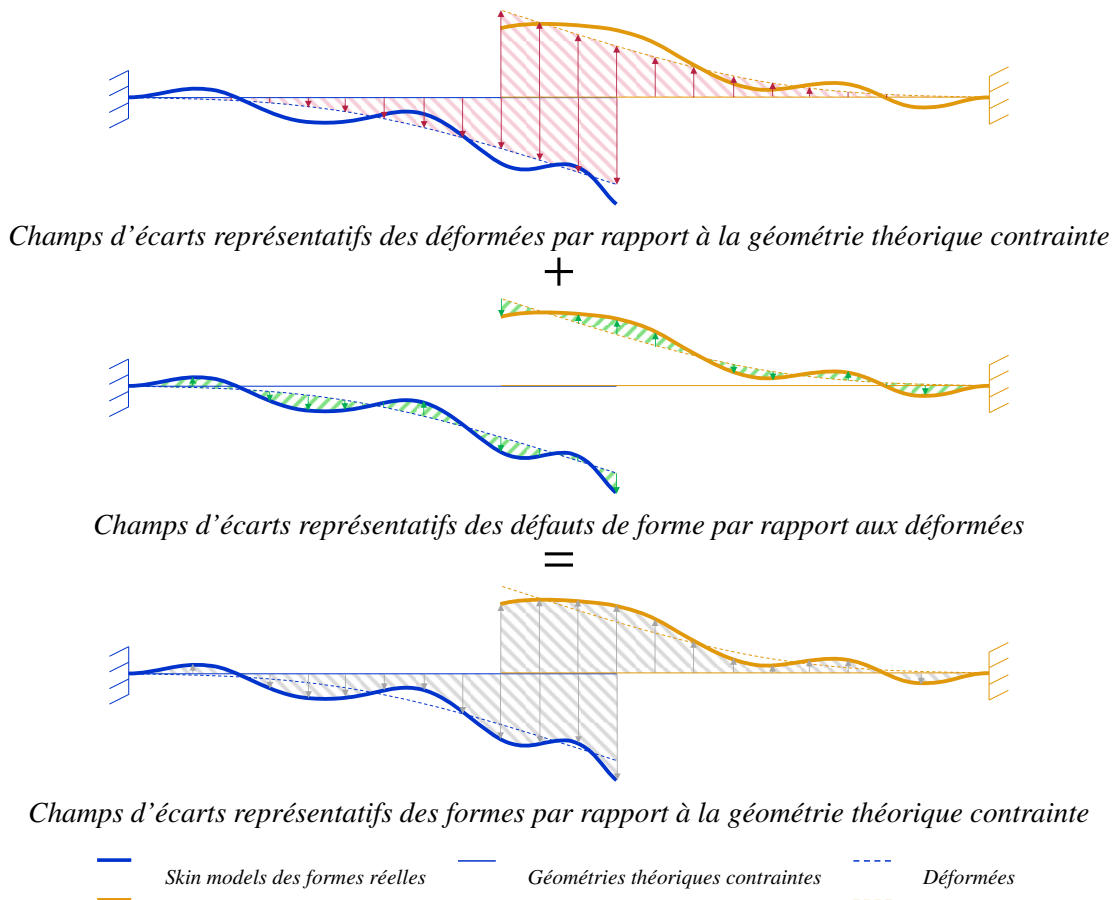


Figure 2.18 – Composition des différents champs d'écarts mentionnés au niveau d'un assemblage de composants souples.

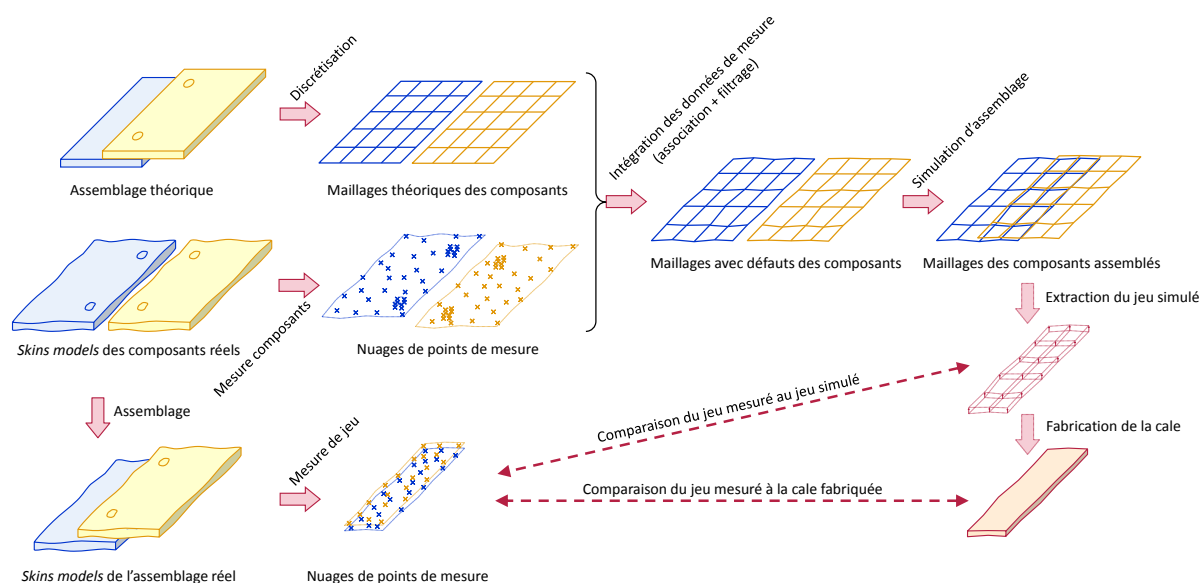


Figure 2.19 – Evolution de la représentation des éléments géométriques au cours du processus de validation par la mesure des résultats de la simulation.

Dans le cas où la discrétisation préliminaire est faite de telle sorte qu'un noeud du maillage nominal correspond à la position nominale de chaque trou, il peut être envisagé de déplacer ce noeud pour représenter la variation géométrique de sa position. Il faudra toutefois s'assurer que le maillage *Eléments Finis* reste viable (c'est-à-dire que les éléments qui contiennent ce noeud conservent une *géométrie de qualité* en vue de la simulation). Dans le cas où la discrétisation préliminaire ne permet pas de représenter la position d'un trou par un noeud, il sera toujours possible d'utiliser le concept de noeud virtuel [Andolfatto, 2013]. Il sera alors nécessaire de projeter un noeud supplémentaire, dit virtuel, dont la position sera déterminée par rapport aux noeuds et aux fonctions de forme de l'élément sur lequel il sera projeté.

En résumé le concept de champ d'écarts permet de faire le lien entre deux géométries, continues ou discrètes. Les écarts géométriques sont modélisables par un seul objet, qui permet une représentation tridimensionnelle. Dans le cadre de la simulation par *Eléments Finis* intégrant des données de mesure, il s'agira toutefois de valider la densité de la discrétisation afin de ne pas introduire un bruit de mesure qui perturberait les performances de la simulation d'assemblage.

4.3 Caractérisation géométrique du jeu spécifique au contexte industriel

Dans l'optique de réaliser le calage physique entre les composants à partir du jeu simulé, il est nécessaire d'extraire de la simulation la géométrie de ce jeu simulé. Il est alors possible de réaliser la cale qui va venir s'insérer entre les deux composants lors de l'assemblage définitif. Ces opérations sont illustrées sur le schéma visible sur la Figure 2.19. De plus, dans l'optique de valider cette simulation de jeu, il est nécessaire de confronter les résultats de simulation à un jeu issu d'un assemblage réel. Il s'agit alors de mesurer ce jeu réel. Celui-ci peut ainsi être confronté au jeu simulé, ou à la cale fabriquée si on souhaite faire intervenir le processus de réalisation des cales dans la boucle de validation.

Le jeu est considéré comme l'espace vide entre les éléments géométriques de deux composants assemblés. Il est ainsi défini d'une part par la position relative de ces deux éléments géométriques, mais également par leur contour respectif. En effet, le jeu est limité par deux zones matérielles qui sont les éléments géométriques des composants, mais également par des zones qui peuvent être immatérielles au niveau des bords notamment. Cela veut dire qu'il est nécessaire de situer les deux éléments géométriques l'un par rapport à l'autre, et de définir également le contour du jeu par rapport au contour de ces deux éléments géométriques.

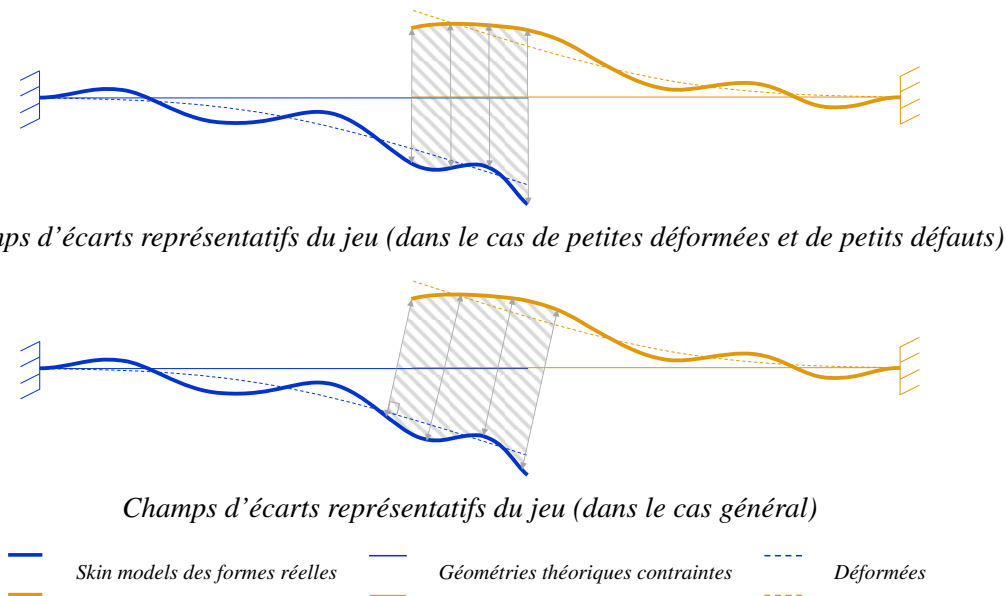


Figure 2.20 – Champs d'écarts représentatifs du jeu.

Le jeu est donc considéré comme un volume.

Sous l'hypothèse de petites déformées et de petits défauts de forme, la géométrie théorique contrainte de l'assemblage peut servir de référence commune. Le jeu est dans ce cas délimité par le contour de l'intersection des projections des surfaces en vis-à-vis sur cette géométrie théorique contrainte. Cette représentation est schématisée sur la *Figure 2.20*. Il est alors possible de représenter le jeu entre les deux composants par la différence des deux champs d'écarts représentatifs des formes par rapport à la géométrie théorique contrainte de l'assemblage.

S'il n'est pas possible de formuler cette hypothèse, l'une des géométries des formes réelles doit servir de référence. L'ordre d'arrivée des composants dans l'assemblage peut par exemple aiguiller ce choix, ou l'orientation des composants par rapport à la gravité (puisque la cale va être assemblée sur le premier composant). Il s'agira alors de définir les écarts dans un repère attaché à cette géométrie de la forme réelle (ou à la déformée de cet état géométrique si les défauts sont de faible amplitude). Ce problème est illustré sur la *Figure 2.20*. Le contour est alors défini par la projection de la surface du second composant sur la géométrie de référence correspondant au premier composant.

Lorsque les géométries sont continues cela semble relativement simple. Par contre lorsqu'on considère des géométries discrètes cela s'avère moins évident à mettre en œuvre. Il est possible de distinguer deux cas de natures différentes, qui sont illustrés sur la *Figure 2.21* :

- ✦ Cas de géométries discrètes *compatibles* : Il s'agit dans ce cas de deux géométries théoriques contraintes discrètes qui possèdent des noeuds en vis-à-vis. Dans ce cas, sous réserve que l'hypothèse de petites déformées et de petits défauts soit vérifiée, un champ d'écarts peut être construit avec comme support chaque noeud des géométries discrètes, et représentant les écarts entre les deux géométries déformées avec défauts.
- ✦ Cas de géométries discrètes *non-compatibles* : Il s'agit au contraire de deux géométries théoriques contraintes discrètes qui ne possèdent pas de noeuds en vis-à-vis. Les densités de noeuds peuvent être différentes. Il n'y aura donc pas forcément de point en vis-à-vis suivant la direction d'évaluation des écarts. Ce cas le plus fréquent soulève ainsi le problème de l'évaluation de distances entre deux entités géométriques discrètes. Lorsque les géométries discrètes sont *compatibles* mais que l'hypothèse de petites déformées et de petits défauts n'est pas respectée, on se retrouve également dans ce cas.

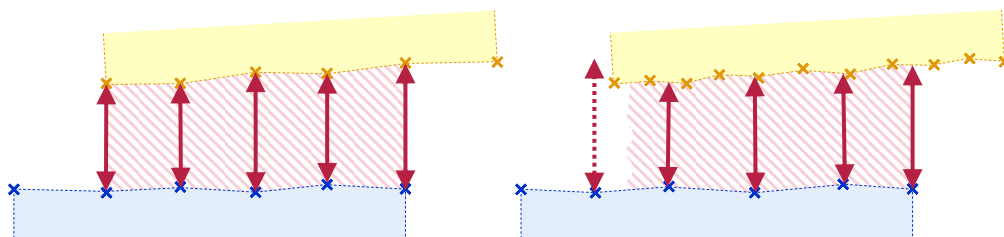


Figure 2.21 – Illustration du problème de compatibilité des géométries discrètes sur la représentation du jeu par un champ d'écarts discret.

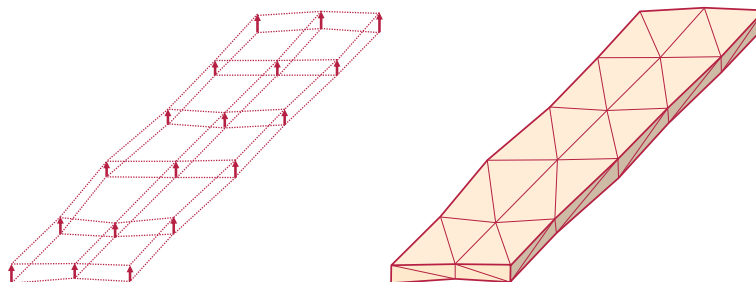


Figure 2.22 – Représentation du même jeu à l'aide d'un champ d'écarts et d'une représentation surfacique.

En effet, dans ce deuxième cas il s'agit d'évaluer une distance entre un point existant et un point qui n'est pas défini. Il est alors possible, sous certaines hypothèses, de construire ce point à partir des points proches. On peut en effet considérer une distance fonction des distances aux sommets de l'élément intersecté par la direction d'évaluation de la distance et de ses fonctions de forme. Concernant le contour du jeu, il s'avère plus complexe de le définir de manière générale. On considérera dans ces travaux que les maillages nominaux sont définis de façon à ce que le contour nominal soit proche du contour simulé ou mesuré.

Dans le cas où le jeu est évalué par la mesure, pour la validation, il s'agit également d'une représentation discrète. La procédure sera la même, avec cependant quelques petites nuances. La densité de points sera plus importante, ce qui aura tendance à limiter les effets de bords. L'évaluation d'une distance à partir de plusieurs points proches sera également meilleure, puisqu'on pourra raisonner sur une moyenne des distances. Il sera toutefois nécessaire de prendre en compte le bruit de mesure éventuel. La représentation sera globalement plus dense.

Il est possible de prendre en compte le processus de réalisation de la cale qui viendra combler le jeu. Dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS* un effecteur est développé afin d'imprimer la cale correspondant à la géométrie du jeu. En sortie de pré-processeur, une géométrie discrète surfacique est générée afin d'être réalisée physiquement. Il semble ainsi judicieux, dans l'optique du calage à l'aide de ce procédé, de fournir directement une géométrie discrète surfacique du jeu. Le format *.stl* permet notamment de faire facilement le lien entre le champ d'écarts construit entre deux géométries discrètes et la géométrie discrète surfacique du jeu (du moins lorsque le contour est défini). La modélisation de la cale correspond alors à l'enveloppe surfacique du champ d'écarts estimé. Ces deux représentations sont visibles sur la Figure 2.22. Une interpolation entre les points définis par le champ d'écarts est nécessaire pour obtenir une enveloppe surfacique de celui-ci.

A partir de là il est possible de fabriquer la cale rigide puis de l'insérer entre les composants lors de l'assemblage. Il est également possible de venir l'imprimer directement sur le composant support. Enfin, dans le cas d'une cale souple (faible épaisseur), il est possible d'envisager de réaliser une cale « à plat » et de venir la déposer dans l'assemblage dans une configuration différente de la configuration d'impression.

Pour cela il sera nécessaire que la densité de points du maillage surfacique puisse également permettre la construction d'un maillage *Eléments Finis* propre sur ces mêmes points, afin de simuler ce changement de configuration.

Cela permet également de boucler avec la discrétisation initiale de la géométrie théorique contrainte. Celle-ci est fonction des objectifs de simulation et des défauts géométriques à représenter. Il serait judicieux de conserver une discrétisation similaire pour la simulation *Eléments Finis* et pour la représentation de la géométrie de la cale. Il est éventuellement possible d'utiliser un maillage *Eléments Finis* relativement large pour modéliser le comportement mécanique global du composant lors de l'assemblage, et un maillage représentatif des défauts géométriques aux interfaces plus fin, lié par des contraintes cinématiques au maillage *Eléments Finis* de base.

Enfin, la comparaison entre les jeux simulés et mesurés nécessite un recalage des données afin de pouvoir quantifier les écarts. Ce recalage peut se faire à l'aide d'une référence, qui peut être un ou plusieurs élément(s) géométrique(s) identifiables dans les deux univers. Dans le cas où cela s'avère compliqué, un *best fit* peut être réalisé entre les géométries des deux jeux afin de procéder à l'évaluation des écarts. Il est nécessaire dans les deux cas de s'assurer que les incertitudes liées à ce recalage sont acceptables.

5 Conclusion

Ce chapitre a permis de définir la notion de caractéristique clé, puis de mettre en avant le jeu comme la caractéristique géométrique clé d'un assemblage de structure aéronautique composite. Les éléments qui interviennent au cours de l'assemblage et qui influent sur la géométrie de ce jeu ont été détaillés : il s'agit des éléments géométriques des composants, du comportement mécanique des composants et des liaisons entre les composants. Les outils et méthodes permettant de caractériser les écarts géométriques propres à ces éléments ont été ensuite étudiés.

Ces différents éléments sont replacés dans le contexte industriel de simulation d'assemblage, afin de faire émerger les contraintes quant à la représentation des éléments géométriques au sein des différents environnements présents au cours du cycle de réalisation d'un produit. La représentation des écarts géométriques sous forme de champs d'écarts permet de faire le lien entre des données de mesure et de simulation pour un état géométrique donné. Cette représentation permet également de faire le lien entre deux états géométriques différents.

Dans le contexte de ces travaux de thèse, il s'agit dans un premier temps de travailler au niveau du composant. Il sera question de l'évaluation par la mesure des caractéristiques géométriques d'un composant souple qui auront un impact lors de l'assemblage. Cela nécessitera d'une part la caractérisation du comportement mécanique du composant, et d'autre part la caractérisation des écarts géométriques, compte tenu du modèle mécanique retenu. L'objectif est ainsi d'intégrer ces données de mesure à des modèles *Eléments Finis* représentatifs de la géométrie des composants. Le *Chapitre 3* fera l'objet de cette étude.

Dans un second temps, il s'agit de passer au niveau du produit assemblé. L'objectif étant la validation du jeu simulé à l'aide de l'outil intégré à *AnaTolFlex*, une première étape consistera à simuler ce jeu à partir du modèle mécanique recalé et des données concernant la géométrie de la forme réelle des composants. Afin de valider le modèle de simulation retenu concernant la modélisation des liaisons et la prise en compte du contact unilatéral et du frottement, une deuxième étape consistera à évaluer ce même jeu par la mesure. La confrontation des résultats de mesure et de simulation de jeu devrait permettre de conclure quant à la performance de l'outil de simulation d'assemblage. Les *Chapitres 4 et 5* détailleront cet aspect de validation de la simulation d'assemblage par la mesure.

Chapitre

3

Evaluation par la mesure de caractéristiques sur des composants souples

Sommaire

1	Introduction	59
2	Métrologie des composants souples	60
2.1	Etat de l'art	60
2.1.1	Systèmes de mise en position	60
2.1.2	Acquisition	63
2.1.3	Traitement des nuages de points	64
2.1.4	Recalage non-rigide des mesures	67
2.1.5	Représentation modale	72
2.2	Synthèse	75
3	Méthode d'évaluation de caractéristiques sur des composants souples	76
3.1	Principe de la méthode	77
3.2	Hypothèses principales sur lesquelles repose la méthode	79
3.2.1	Petites déformées et petits défauts de forme	79
3.2.2	Repères d'expression des géométries	79
3.2.3	Représentation homogène des géométries	80
3.2.4	Limitation des incertitudes	81
3.3	Nature des défauts et déformées représentables	82
4	Illustration de la méthode	84
4.1	Système de mesure utilisé	84
4.2	Support de démonstration	85
4.3	Evaluation de la géométrie de la forme réelle contrainte par la mesure	87
4.3.1	Acquisition	87
4.3.2	Traitement	88
4.4	Evaluation de la déformée due à l'environnement qui contraint le composant par la simulation	93
4.4.1	Modélisation de la géométrie du composant	93
4.4.2	Modélisation de la configuration de mesure	94
4.4.3	Modélisation du comportement mécanique	95
4.4.4	Simulation numérique et compensation	95
4.5	Synthèse	96
5	Conclusion	97

1 Introduction

Actuellement les opérations de mesure font partie intégrante du processus industriel d'assemblage. En effet, s'appuyer sur des données qui concernent la géométrie de la forme réelle des composants permet d'améliorer les performances des opérations d'assemblage. Cependant la nature flexible des composants, qui implique une géométrie variable en fonction de l'environnement dans lequel se trouve contraint le composant, est encore peu considérée, et engendre des difficultés au niveau des postes d'assemblage.

De nombreux exemples industriels soulignent ces difficultés. Prenons l'exemple d'un panneau de structure aéronautique fabriqué sur un site, contrôlé après fabrication et expédié sur un autre site pour être assemblé. Le panneau est une nouvelle fois mesuré à sa réception, dans une configuration différente de celle dans laquelle il a été contrôlé sur le premier site. La confrontation des résultats de mesure met en avant une différence notable entre les deux géométries mesurées, visibles sur la *Figure 3.1*. En effet, la géométrie de la forme réelle du composant est variable.

Concernant le contrôle de composants souples, les normes [ISO 10579, 2010] et [ASME Y14.5, 2009] préconisent de stipuler les conditions dans lesquelles doivent être réalisées les mesures. Ainsi la configuration de mesure est entièrement définie, par le détail de la mise et du maintien en position du composant et de l'orientation par rapport à la gravité. Cependant cela nécessite un outillage qui permet de mettre le composant dans ces conditions. Du fait de la dimension des composants de structure dans le domaine aéronautique, ces outillages peuvent être très coûteux.

Modifier le processus d'assemblage en imposant des configurations d'assemblage et de mesure (voire de fabrication) compatibles paraît impossible à l'heure actuelle. Par exemple les tronçons sont assemblés entre eux à l'horizontale, alors que certains, comme la pointe avant, sont assemblés individuellement et mesurés pour validation à la verticale. Cette deuxième configuration permet de limiter les effets de la gravité sur les composants d'un tronçon lors de leur assemblage. Cependant lorsque le tronçon est remis à l'horizontale, sa géométrie est différente, et il est peu probable qu'il s'assemble avec le suivant sans que cela nécessite des réglages.

Ainsi le déroulement des opérations d'assemblage est fortement dépendant des configurations dans lesquelles se trouvent les composants. Actuellement aucun outil ne permet de s'affranchir de ces configurations afin de garantir le bon déroulement de ces opérations et le respect final des exigences sur l'assemblage.

L'objectif de ce chapitre est de présenter une méthode permettant l'évaluation de caractéristiques sur des composants souples en s'affranchissant des configurations de mesure des composants. Cette méthode doit permettre l'évaluation d'une même caractéristique quelle que soit la configuration de mesure choisie.

La section 2 présente un état de l'art de la *métrologie des composants souples*. Plusieurs thèmes sont abordés, concernant le posage des composants qui va caractériser la configuration de mesure, l'acquisition de la géométrie de composants souples, le traitement des données de mesure, le recalage non-rigide des données de mesure qui va permettre la prise en compte de la configuration de mesure, et la représentation modale de la géométrie mesurée. Une synthèse permettra alors de mettre en avant les choix effectués pour la mise en œuvre de la méthode d'évaluation de caractéristiques sur des composants souples et les revendications.

La section 3 expose cette *méthode d'évaluation de caractéristiques sur des composants souples*. Le principe général est présenté, ainsi que les hypothèses importantes sur lesquelles repose celle-ci. Un point est également fait sur la nature des défauts et déformées qu'il est possible de caractériser.

La section 4 illustre sur un exemple simple la *mise en œuvre de la méthode présentée*. Le dispositif expérimental et le système de mesure utilisés sont présentés. Ensuite est détaillée l'évaluation par la mesure et par la simulation des différentes grandeurs représentatives de la géométrie de la forme réelle du composant.

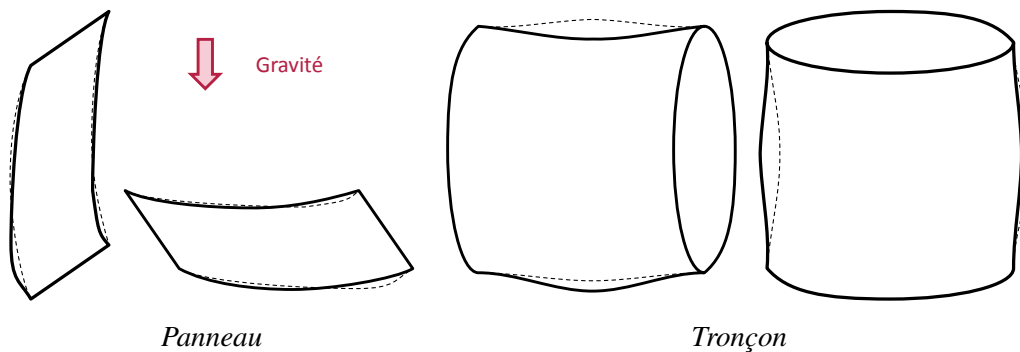


Figure 3.1 – Variation de la géométrie réelle d'un composant en fonction de sa configuration.

2 Métrologie des composants souples

L'état géométrique d'un composant souple est fortement dépendant de son environnement. L'orientation du composant par rapport à la gravité ainsi que la géométrie du support qui soutient le composant influent sur la géométrie de celui-ci. Il est ainsi préconisé dans les normes [ISO 10579, 2010] et [ASME Y14.5, 2009] de définir, en plus de la cotation *GPS* classique, les conditions dans lesquelles doit se trouver le composant lors de sa mesure ou de son contrôle.

Ainsi le processus de mesure de composant souple doit tenir compte à la fois de la configuration dans laquelle se trouve le composant, du système de mesure utilisé et du processus de traitement nécessaire. De nombreux travaux de la littérature traitent de ces différents aspects. Ils sont détaillés dans la première partie de cette section. Ensuite une synthèse permet de mettre en place le cadre de l'étude menée dans ces travaux de thèse.

2.1 Etat de l'art

2.1.1 Systèmes de mise en position

L'environnement a un impact sur la géométrie d'un composant souple. Cet environnement est défini d'une part par l'orientation du composant par rapport à la gravité, et d'autre part par les éléments de mise et de maintien en position de celui-ci. La géométrie de la forme réelle du composant est ainsi propre à chaque configuration.

En métrologie de composants rigides, les supports (de mesure ou d'usinage) sont conçus de façon à rendre isostatique la mise en position du composant sur celui-ci, afin de garantir une bonne répétabilité de mise en position. Dans le cas de composants flexibles, cet isostatisme de mise en position est parfois plus compliqué à définir. En effet, [Zirmi *et al.*, 2007] détaille la conception d'un montage d'usinage, qui peut s'apparenter à un montage de métrologie sous certains aspects. Au delà du choix technologique des éléments en contact avec la pièce, ces travaux détaillent les critères à prendre en compte afin d'optimiser le placement de ces éléments. Trois critères évoqués sont en lien direct avec le contexte de la métrologie de composant souple :

- ✦ La *stabilité* : les éléments qui constituent l'appui prépondérant doivent être placés de façon à obtenir le plus grand triangle de sustentation. Les efforts sont également à prendre en compte. Dans le cas de la métrologie il s'agit des efforts de bridage et de palpation, ainsi que le poids propre du composant.
- ✦ La *déformation* : les éléments du montage sont placés de manière à minimiser les déformations du composant.
- ✦ La *rigidité* (du montage) : celle-ci est seulement évoquée afin de limiter les vibrations dans le cadre de l'usinage.

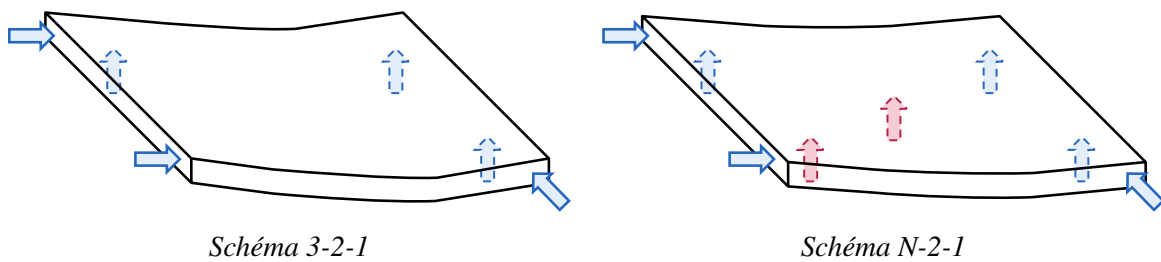
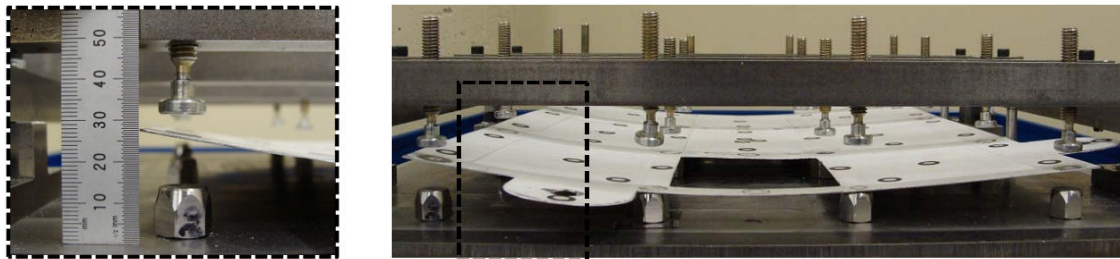


Figure 3.2 – Schémas de mise en position.

Figure 3.3 – Support expérimental permettant de faire varier le nombre et la position des appuis [Abenhaim *et al.*, 2012a].

Dans le cadre de la métrologie de composant flexible, il est nécessaire de maîtriser la rigidité du montage, ce qui permettra de garantir la non-variation de la configuration du composant au cours de la mesure, et donc de la géométrie de la forme réelle de celui-ci. Concernant la déformation, il n'est pas forcément nécessaire de la minimiser lorsque le processus de mesure tient compte de cette déformation potentielle. Cependant il peut s'avérer préférable de la limiter afin de garantir par exemple des conditions de mesure similaires lors de l'acquisition.

Dans le contexte de l'aéronautique, les mises en position des composants sont rarement isostatiques du fait de leurs grandes dimensions et des déformées importantes auxquelles ils peuvent être soumis. Il est souvent nécessaire d'ajouter des points d'appui afin de rendre plus stable les posages ou de minimiser les déformées des composants. Les schémas classiques de mise en position 3-2-1 sont alors remplacés par des schémas N -2-1 (avec N supérieur à 3), illustrés sur la Figure 3.2. On considère alors que les appuis 3-2-1 réalisent les liaisons de positionnement du composant sur son support, et que les $N - 3$ appuis restant réalisent les liaisons d'attachement décrites par [Whitney *et al.*, 1995].

Les travaux présentés dans [Abenhaim *et al.*, 2012a] mettent en avant l'influence de ces appuis supplémentaires sur la géométrie du composant qu'ils supportent. En fonction du nombre et de la position des appuis, la forme réelle sous contrainte du composant change. Le support expérimental est visible sur la Figure 3.3. La répétabilité de mise en position est étudiée, et tend à diminuer lorsque le nombre d'appuis augmente. Un positionnement judicieux des appuis peut tout de même limiter cet effet. Finalement une surabondance des appuis tend même à conformer la pièce à son support de mesure. Les données de mesure reflètent alors autant la forme du composant que celle de son support.

Dans le même registre [Cai *et al.*, 1996] propose une méthode pour optimiser le nombre et la position de ces N appuis afin de minimiser la déformée du composant. La mise en position se fait dans le cadre de l'assemblage et non de la mesure, mais la problématique reste la même. [Camelio *et al.*, 2004] montre également que la configuration de positionnement d'un composant souple influence la géométrie de celui-ci, et donc le résultat de l'assemblage avec un autre composant. Dans ce cas précis l'optimisation de la position des points d'appuis a pour objectif de minimiser les déformées des composants soumis aux efforts de soudage lors de l'assemblage.

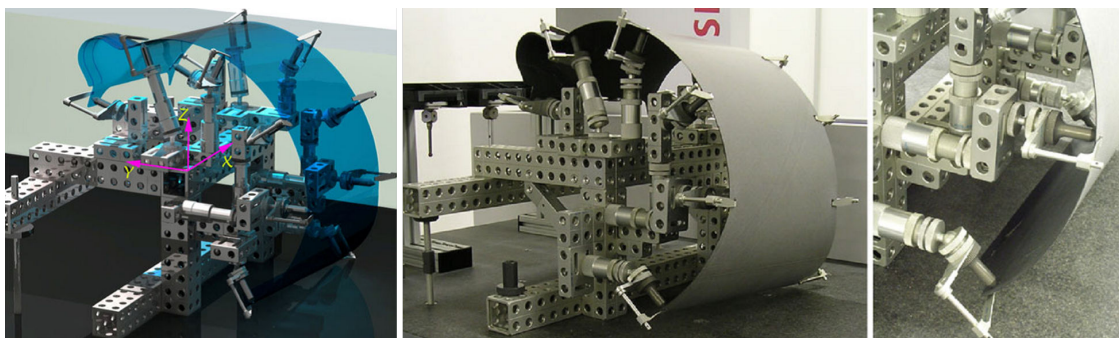


Figure 3.4 – Support de mesure dédié [Ascione et Polini, 2010].

D'autres font le choix inverse, c'est-à-dire d'utiliser des montages dédiés afin de conformer les composants avant la mesure, notamment [Moroni *et al.*, 2007] ou [Ascione et Polini, 2010]. Le composant est conformé à sa géométrie théorique sous contrainte d'assemblage, comme sur la Figure 3.4. Cela permet de pouvoir exploiter directement les résultats de mesure en les confrontant à la géométrie théorique contrainte. Cependant il est nécessaire de réaliser un support de mesure adapté à chaque composant, et qui reproduise avec fidélité les contraintes d'assemblage. De plus chaque défaut géométrique au niveau de ce support sera répercuté sur la géométrie du composant en question, et induira donc des écarts géométriques supplémentaires au niveau de la géométrie mesurée.

Du fait du coût important de ce type de montage, puisque celui-ci est dédié à chaque géométrie de composant, la tendance est à la mesure de composant souple sous un minimum de contraintes. Il est en effet jugé plus intéressant économiquement d'utiliser un montage de mesure relativement simple ou universel. La difficulté consiste alors à évaluer le résultat de la mesure effectuée dans une certaine configuration (*configuration de mesure*) vis-à-vis de spécifications qui sont valables dans une configuration différente (*configuration d'assemblage final* très souvent).

[Abenhaim *et al.*, 2012b] dresse un état de l'art des techniques d'inspection de composants souples. On y retrouve notamment les techniques qui consistent à contraindre le composant (sur gabarit, à l'aide d'appuis mobiles, sous effort prédéfini, ...). Ces méthodes sont illustrées et classées sur la Figure 3.5, tirée de [Abenhaim, 2009]. Sont également décrites des méthodes qui visent au contraire à s'abstenir de sur-contraindre la pièce à mesurer, en utilisant des supports de mesure de géométrie relativement simples. Dans ce cas les méthodes ont essentiellement recours à une étape de simulation des conditions de mesure afin d'obtenir une image de la géométrie à l'état libre du composant. Ces méthodes ont fait l'objet de nombreux travaux ces dernières années. Elle seront détaillées dans la Section 2.1.4.

Enfin, de nombreux travaux traitent, en rigide, de la *mesure par retournement* (également appelée *méthode inverse*) [Whitehouse, 1976] [Evans *et al.*, 1996]. La norme [ISO 230-1, 2012] illustre ce principe sur l'évaluation de l'écart de rectitude d'un axe de machine. Il s'agit de mesurer une règle placée sur la table de la machine, table qui sera déplacée suivant l'axe dont on cherche à évaluer le défaut. La règle est alors retournée à 180° , et remesurée. La demi-somme des mesures permet d'évaluer l'écart de rectitude de la surface de référence de la règle, car sous réserve que les incertitudes de mesure soient faibles, l'écart de rectitude de l'axe s'annule. Sur le même principe la demi-différence permet d'évaluer l'écart de rectitude de l'axe.

L'étude bibliographique n'a pas permis de trouver des travaux similaires réalisés dans un contexte flexible. Il semblerait pourtant que cette méthode de *mesure par retournement* puisse permettre également de s'affranchir de certaines composantes des écarts géométriques. En choisissant deux configurations qui permettent de soumettre le composant à des sollicitations opposées, la demi-somme des deux états géométriques évalués annule les écarts géométriques conséquences de ces sollicitations (sous l'hypothèse de

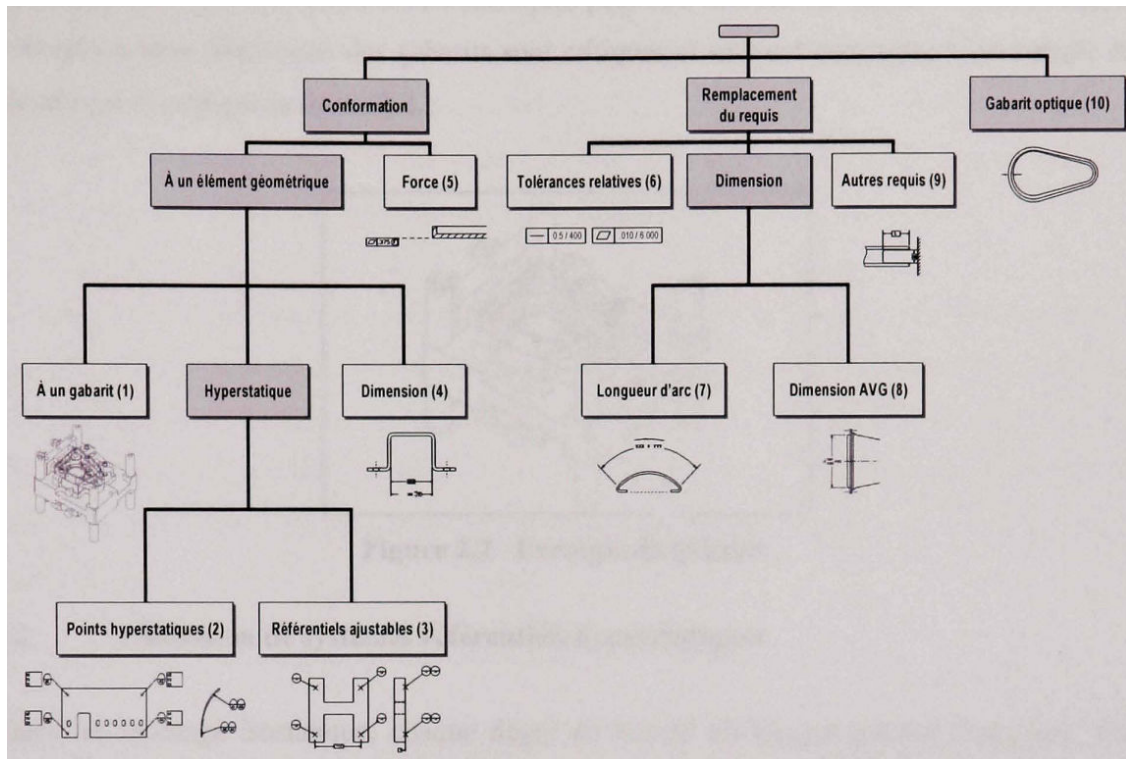


Figure 3.5 – Classification des principales méthodes de contrôle des pièces flexibles [Abenheim, 2009].

petits défauts de forme). Cette méthode, faisant intervenir seulement le domaine de la mesure, et non de la simulation, représente une perspective intéressante dans l'optique de la validation de méthodes basées sur la compensation des effets de l'environnement par la simulation.

2.1.2 Acquisition

Dans cette section est considérée l'acquisition de la géométrie de composant souple ou de forme complexe. Les composants de type aéronautique tels que des panneaux de structure sont flexibles, du fait de leurs forme élancée et de leur faible épaisseur. Il est également possible de les considérer de forme complexe puisque, en plus d'être souvent bi-courbure, les déformations géométriques qu'engendrent leur souplesse peuvent être importantes.

Tout d'abord [Li et Gu, 2004] réalisent un état de l'art sur l'inspection de surfaces de forme complexe. Tout un éventail de technologies de mesure, avec ou sans contact, sont détaillées. On y retrouve notamment les systèmes de mesure par triangulation *LASER*. Les systèmes de mesure sans contact sont considérés comme beaucoup plus rapides que les systèmes de mesure avec contact car ils permettent d'acquérir un très grand nombre de points relativement rapidement. Cependant la qualité de mesure est moins bonne et les conditions de mesure sont plus contraignantes (aspect de surface du matériau notamment). Il est également question des méthodes de traitement associées à ces technologies.

[Savio *et al.*, 2007] réalisent également un état de l'art sur les technologies de mesure de surfaces de forme complexe. Les composants pour l'aéronautique (ailes et fuselage) et l'automobile (carrosserie) font partie des composants de forme complexe. Ils sont considérés généralement comme des composants de moyennes et grandes dimensions, de complexité de forme faible et moyenne, sur lesquelles les tolérances relatives sont de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} . Ils nécessitent ainsi des moyens de mesure adaptés tels que des *LASER* Trackers, des systèmes par triangulation *LASER* ou par projection de franges, mais également des systèmes classiques de mesure par contact.

Concernant plus particulièrement la mesure sans contact par moyen optique, [Schwenke *et al.*, 2002] réalisent un état de l'art pour la métrologie dimensionnelle. On y retrouve également tout un panel de systèmes de mesure optique dédiés à diverses applications et à diverses échelles. Sont entre autres évoqués les moyens de mesure par triangulation *LASER*, par projection de frange ou par photogrammétrie. Une section est également consacrée au couplage de systèmes de mesure de différentes technologies.

[Martinez *et al.*, 2010] réalisent une comparaison des performances de systèmes de mesure avec et sans contact. Les mesures d'artefacts réalisées à l'aide de deux systèmes de mesure sont confrontées, l'une réalisée à l'aide d'un capteur *LASER* par triangulation et l'autre à l'aide d'un palpeur à contact. Il met en évidence le fait que le grand nombre de points obtenus par mesure sans contact permet d'avoir une représentation détaillée de l'objet numérisé, mais la dispersion des points entache le résultat d'une incertitude supérieure au résultat obtenu par mesure avec contact. Il est également conseillé de travailler avec une orientation de capteur unique, car le recalage des vues est une cause majeure d'incertitude sur le résultat de mesure.

Ensuite [Estler *et al.*, 2002] [Saadat et Cretin, 2002] et [Peggs *et al.*, 2009] réalisent des états de l'art concernant la mesure de composants de grande dimensions. Sont ainsi passées en revue des technologies de mesure par triangulation *LASER*, par interférométrie *LASER*, par *LASER* Trackers, par multilatération ou encore par photogrammétrie. Ces systèmes de mesure sont très utilisés dans l'industrie aéronautique notamment.

[Weckenmann *et al.*, 2009] réalisent un état de l'art concernant l'acquisition multi-capteur. Il consacre notamment une section à l'utilisation conjointe de capteurs à contact et de systèmes de mesure optique. La technologie de mesure sans contact permet d'obtenir rapidement une grande quantité d'information concernant la géométrie de la pièce mesurée, qui va servir à guider la mesure par capteur à contact. Il est également question de l'utilisation du capteur à contact afin de recalibrer les mesures effectuées à l'aide du capteur optique. L'intérêt est d'autant plus grand lorsque les deux technologies sont intégrées sur un même capteur.

Concernant la mesure sans contact par capteur *LASER* plan, les travaux de [Besic *et al.*, 2011] soulignent les phénomènes liés à l'utilisation de cette technologie, tels que le bruit de numérisation important et variable en fonction de la configuration de mesure. De plus il est question dans [Van Gestel *et al.*, 2009] de l'effet de l'échauffement du capteur sur la validité de la calibration de celui-ci. Dans les deux cas il est possible d'observer des erreurs importantes lorsque les mesures ne sont pas réalisées dans des conditions optimales préconisées par le fabricant.

Enfin, les nombreux travaux réalisés autour de la cellule de mesure du laboratoire constituent une base forte quant à la mise en œuvre de technologies de mesure avec et sans contact. Notamment les travaux de Contri, Lartigue, Mehdi-Souzani et Audfray, qui seront présentés dans la *Section 2.1.3*, s'appuient sur une technologie de mesure sans contact par triangulation *LASER*, technologie tout à fait adaptée pour la mesure de composant souple.

2.1.3 Traitement des nuages de points

Quel que soit le système d'acquisition utilisé, il est nécessaire de traiter les données de mesure brutes afin d'en extraire les informations recherchées. Dans cette section sont détaillées des méthodes adaptées au traitement de nuages de points issus de mesure optique sans contact.

La première étape consiste à faire correspondre les données de mesure à une géométrie de référence. Il s'agit souvent de la géométrie nominale lorsqu'on souhaite faire de l'inspection. Celle-ci peut alors être considérée de façon continue ou discrète. Dans le cadre de la métrologie de composant souple, il peut éventuellement s'agir d'une géométrie nominale déformée.

La méthode classique présentée par [Besl et McKay, 1992] utilise un algorithme *ICP* (*Iterative Closest Point*), qui permet de faire correspondre deux représentations d'une même géométrie. Il s'appuie sur une

recherche préliminaire des points dits *voisins*, c'est-à-dire les points du nuage les plus proches des points de la référence. Une minimisation des distances points de mesure - points de la référence, au sens des moindres carrés, permet un recalage des points de mesure par rapport au nominal en appliquant un mouvement de corps rigide à l'ensemble de ces points. Il est nécessaire que les points de mesure soient dans une configuration relativement proche de la référence, en réalisant un recalage préliminaire, pour favoriser la rapidité de convergence et la qualité du résultat final.

Les nuages de points de mesure pouvant être très denses, il est intéressant d'utiliser des méthodes permettant de parcourir rapidement les données, s'appuyant principalement sur un partitionnement préliminaire de l'espace. Dans le cas présent, pour des espaces de dimension 3, les méthodes de partitionnement les plus efficaces, en terme de temps de calcul notamment, sont celles de type *kd-tree*, introduites par [Bentley, 1975]. Il s'agit de partitionner l'espace des points de mesure par divisions successives.

Ensuite un algorithme de recherche du plus proche voisin, décrit par [Friedman *et al.*, 1977], permet de créer un lien entre les deux géométries discrétisées. Des variantes permettant de rechercher les k plus proches voisins ou de rechercher le plus proche voisin dans une zone particulière, existent également. Lorsqu'on travaille sur des données brutes issues de mesure par triangulation *LASER*, et par conséquent relativement bruitées, il est intéressant de sélectionner un ensemble de points plutôt qu'un point isolé.

Les travaux de [Bispo et Fisher, 1996] sont basés sur le recalage *ICP* de Besl, puisqu'il s'agit de faire correspondre un nuage de points de mesure à une géométrie nominale. L'étape suivante est alors la détermination du défaut de forme mesuré en analysant les distances résiduelles entre les points de mesure recalés et la géométrie de référence. La validation du respect de la spécification s'effectue en vérifiant que l'image reconstruite à l'aide des distances résiduelles est dans la zone de tolérance définie à partir de la spécification.

De nombreux travaux présents dans la littérature s'appuient sur ce principe, avec quelques variantes. [Huang *et al.*, 1996] et [Huang et Gu, 1998] préconisent l'utilisation partielle du nuage de points de mesure pour réaliser le recalage à l'aide de l'algorithme *ICP*, en se basant sur les données les moins bruitées. [Pahk et Ahn, 1996] réalise un recalage préliminaire des points de mesure à l'aide de 6 points particuliers. Si les points sont choisis correctement, le recalage préliminaire permet de positionner les points de mesure dans une configuration suffisamment proche pour garantir une convergence rapide et un résultat de qualité. [Li et Gu, 2005a] et [Li et Gu, 2005b] procède en utilisant des mesures réalisées sur des éléments de référence pour effectuer un recalage préliminaire, ou pour effectuer un recalage *ICP* partiel, autorisé suivant les degrés de liberté non bloqués par les références mesurées. Enfin, [Ravishankar *et al.*, 2010] utilise un algorithme *ICP* modifié en minimisant pour chaque point un ensemble de quatre distances aux points les plus proches topologiquement.

Tous ces travaux traitent cependant du recalage de nuages de points de mesure de composants rigides par rapport à leur géométrie nominale. Ainsi, aux défauts géométriques et aux incertitudes de mesure et de recalage près, les géométries sont relativement proches. Dans le cas de composants souples il peut être plus compliqué de faire correspondre les deux géométries. En effet, la déformée que subit le composant peut être d'un ordre de grandeur plus grand que les défauts géométriques. Il peut être judicieux dans ce cas d'utiliser des éléments de références pour le recalage.

Une fois les données de mesure recalées, l'étape suivante consiste à analyser les données. [Contri *et al.*, 2002] et [Contri, 2002] analysent la qualité des données brutes obtenues par mesure sans contact par triangulation *LASER*. Les effets du système optique, c'est-à-dire du *LASER* et des lentilles, ne font pas partie de l'étude. Les travaux mettent en avant les incertitudes de mesure liées au bruit de numérisation et à la position d'un point de mesure dans le référentiel de la caméra *CCD*. Il est ainsi possible de tracer une cartographie d'incertitudes dans l'espace de mesure, et d'associer une incertitude globale 3D à chaque point du nuage.

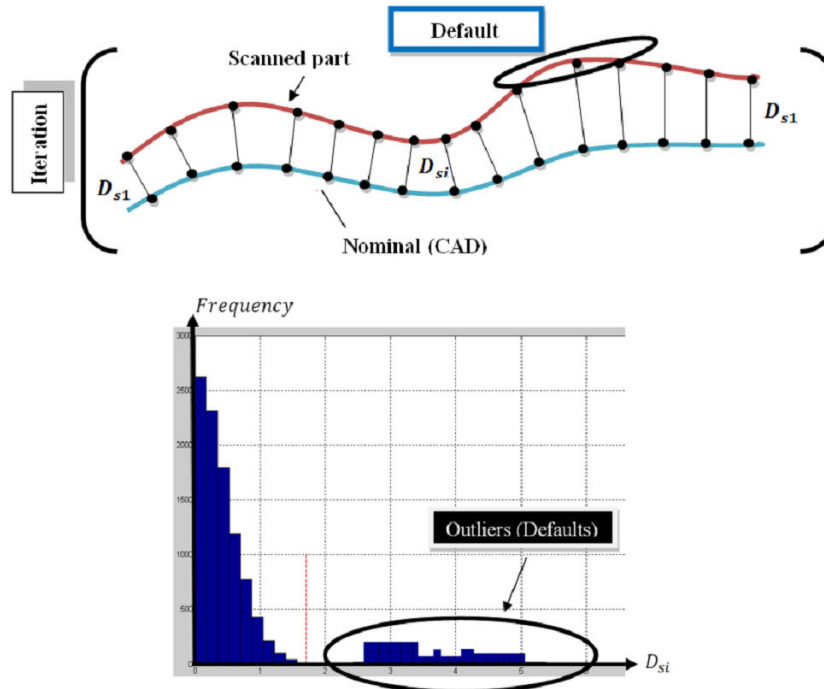


Figure 3.6 – Procédure permettant d’évaluer des défauts géométriques locaux sur un nuage de points de mesure [Aidibe *et al.*, 2012].

Dans la continuité de ces travaux [Lartigue *et al.*, 2002] et [Mehdi-Souzani *et al.*, 2006] abordent la notion d’indicateurs de qualité pour caractériser un nuage de points de mesure. Ces indicateurs sont les suivants :

- ✈ δ -bruit : écart-type de la répartition des écarts entre les points de mesure et une référence (dans le cas d’une répartition gaussienne, classique pour les systèmes optiques).
- ✈ ρ -densité : rayon maximal d’une sphère, centrée en chaque point de mesure, qui ne contient qu’un seul et unique point de mesure.
- ✈ κ -complétude : proportion de la surface qui a été numérisée.
- ✈ τ -exactitude : incertitude liée à chaque point en fonction de sa position sur la caméra CCD lors de l’acquisition.

Ces indicateurs permettent de qualifier un nuage de points de mesure. Il peuvent ainsi permettre de juger de la qualité d’une numérisation réalisée. Il peut également être intéressant d’observer l’influence de ces paramètres sur la qualité du résultat final de mesure, c’est-à-dire la valeur de la caractéristique identifiée à partir des points de mesure.

[Mehdi-Souzani *et al.*, 2006] réalise ainsi une optimisation de la trajectoire de numérisation d’un capteur *LASER* plan afin de maximiser la complétude (κ). Les contraintes concernent la qualité des données de mesure représentée par l’exactitude (τ), qui est déterminée dans le cas de ce type de capteur par la distance de numérisation et les angles d’inclinaison du capteur par rapport à la surface numérisée. Dans le même registre [Mahmud *et al.*, 2011] réalise également une optimisation de la trajectoire de numérisation à l’aide d’un capteur *LASER* plan, afin de garantir des bonnes conditions de mesure pour l’évaluation d’une spécification. L’incertitude acceptable au niveau de la mesure est définie à $1/8$ de l’intervalle de tolérance de la spécification en question. Les contraintes d’optimisation sont liées aux critères de densité (ρ), de complétude (κ) et d’exactitude (τ). Il s’agit de garantir une densité suffisante, fonction du choix de la densité de la ligne *LASER* et d’une vitesse de numérisation adaptée. L’étude de la complétude passe par une étude de visibilité pour la définition des vues du capteur. L’exactitude est déterminée par le choix des angles et distances de nu-

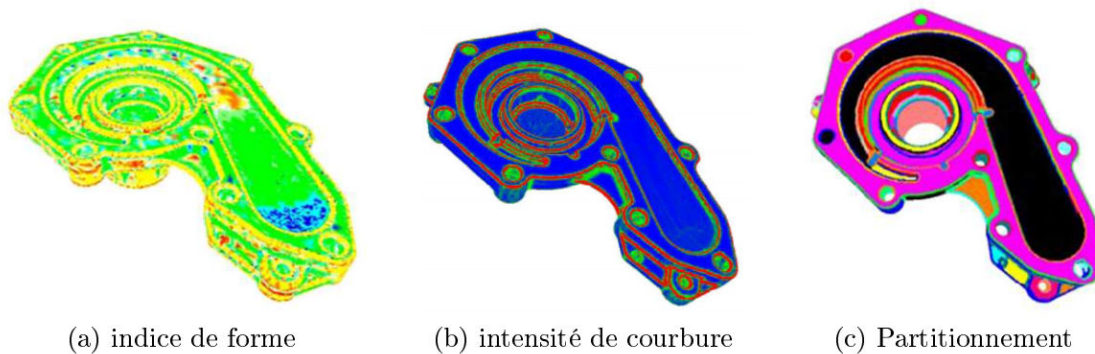


Figure 3.7 – Segmentation d'un corps de pompe [Zhao, 2010].

mérisation adaptés. Enfin, le bruit (δ) est limité par le choix des angles de numérisation, et par l'application d'une couche de matifiant sur le composant.

Ensuite il s'agit d'identifier des caractéristiques géométriques sur les données de mesures. [Aidibe *et al.*, 2012] et [Abenhaim *et al.*, 2011] procèdent de manière similaire pour recaler les données de mesure sur la géométrie théorique contrainte discrète, en calculant des distances point de mesure - point de la référence, projetées sur les normales à la référence. La procédure est illustrée *Figure 3.6*. Une étude de la répartition statistique des valeurs des distances calculées permet de localiser des défauts géométriques. En effet, sous l'hypothèse de répartition suivant une loi normale des distances lorsque la géométrie est sans défauts (hypothèse compatible avec un système de mesure par triangulation *LASER*), toutes les distances qui sont au delà d'un seuil fixé correspondent à un défaut géométrique. Cette méthode semble apparemment bien adaptée à la localisation de défauts locaux, caractéristiques des matériaux composites. [Aidibe, 2014] procède de la même manière en réalisant cette fois-ci un test de *Thompson-Biweight*, basé sur la variation de courbure, pour détecter des défauts géométriques locaux.

[Audfray *et al.*, 2010] et [Audfray *et al.*, 2013] détaillent le processus d'acquisition complet, allant jusqu'à l'identification de caractéristiques à partir des points de mesure obtenus par triangulation *LASER*. Une opération de segmentation, visible sur la *Figure 3.7*, basée sur l'analyse de courbure du nuage de points, est réalisée afin de séparer les données de mesure correspondant à différentes entités géométriques. Cette opération se base sur l'*indice de forme* et l'*intensité de courbure* définis par [Zhao, 2010] pour déterminer la nature des surfaces numérisées. [Prieto *et al.*, 1999] procède de façon similaire pour réaliser la segmentation et l'identification de la nature des entités géométriques mesurées, en se basant sur l'orientation des normales et la valeur des courbures gaussienne et moyenne identifiées sur le nuage de points de mesure.

De même [Kase *et al.*, 1999] utilise les courbures principales pour détecter des défauts locaux sur des nuages de points de mesure. La différence entre la courbure nominale et la courbure identifiée sur les points de mesure permet l'identification de ces défauts. L'utilisation des normales permet de détecter des défauts globaux, toujours en se référant à leur orientation nominale.

Enfin, [Sun *et al.*, 2002] s'affranchit du passage par une géométrie de référence. Il réalise un maillage sur les points de mesure, ce qui lui permet d'obtenir la normale à chaque élément. C'est l'analyse de la variation d'orientation de la normale qui lui permet de segmenter le nuage de points de mesure, avant d'étudier les caractéristiques propres à chaque zone.

2.1.4 Recalage non-rigide des mesures

Dans le cas de composants souples, les résultats de mesure sont dépendants de la configuration du composant puisque celle-ci influe sur sa géométrie. Cependant il est souvent nécessaire d'exploiter le résultat

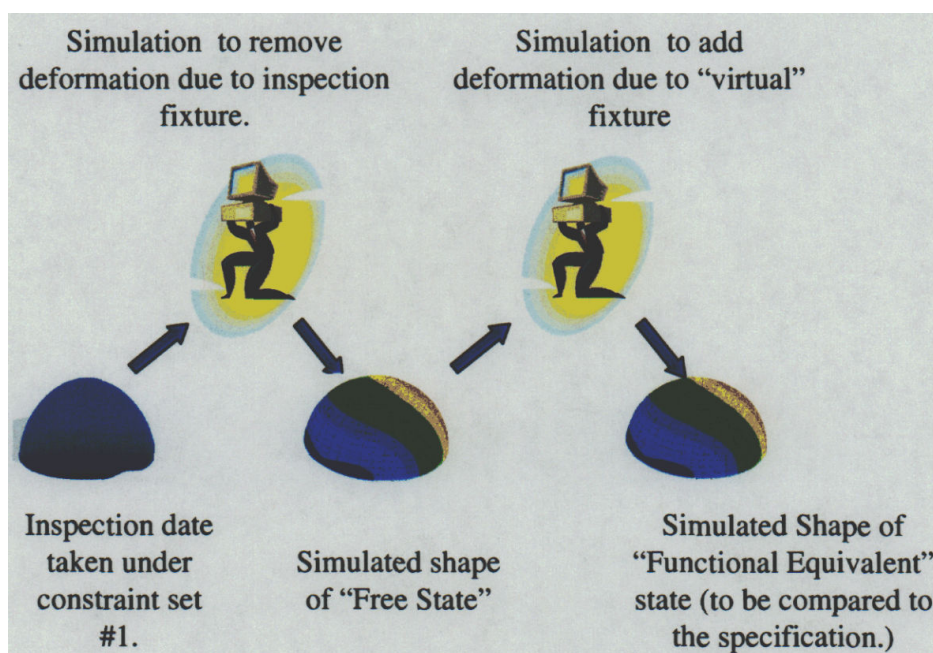


Figure 3.8 – Principe exposé par [Blaedel *et al.*, 2002].

de mesure, obtenu dans une configuration donnée, dans une autre configuration ou dans un cas général. Il est alors nécessaire de procéder à un recalage non-rigide des données de mesure.

Dans [Lartigue *et al.*, 2006] est exposé le principe de la méthode qui permet d'évaluer la géométrie d'un composant souple, quelle que soit la configuration connue dans laquelle il peut être mesuré. Sous l'hypothèse de *petits déplacements*, il est théoriquement possible de considérer la géométrie de la forme réelle d'un composant dans une configuration donnée comme la somme de la géométrie de sa forme à l'état libre et de sa déformée due à son environnement de mesure (support de mesure et pesanteur). Des pistes sont données pour évaluer la géométrie de la forme réelle par mesure sans contact et la déformée engendrée par l'environnement de mesure par simulation *Eléments Finis*. Il est alors possible de déterminer la géométrie à l'état libre par différence des deux termes.

De nombreux travaux sont basés sur le même raisonnement pour tenter d'évaluer, par la mesure et par la simulation, la géométrie à l'état libre de composants souples.

[Blaedel *et al.*, 2002] avait déjà mis en application cette méthode. La Figure 3.8 expose l'objectif de l'auteur. La première étape consiste, après mesure du composant dans sa configuration de mesure, à supprimer les effets de l'environnement par simulation pour obtenir une représentation de la géométrie à l'état libre du composant. La seconde étape consiste alors à imposer virtuellement les effets d'un environnement différent, correspondant à celui précisé pour la vérification des spécifications, pour pouvoir procéder à la vérification du respect de celles-ci.

La démarche expérimentale est détaillée point par point. Elle est appliquée au cas d'un cylindre creux de faible épaisseur maintenu par trois mors. D'une part un chargement est appliqué physiquement au composant, tandis que sa géométrie est mesurée avant et après application de ce chargement. D'autre part le maillage support de la simulation *Eléments Finis* est défini à partir d'un maillage nominal et des mesures effectuées sur le composant avant chargement (la grille de mesure correspond directement au maillage de référence). La géométrie sous chargement est simulée. Les résultats obtenus sont visibles sur la Figure 3.9.

Quelques remarques pertinentes sur la mise en œuvre sont également évoquées. Tout d'abord la modélisation des conditions limites est difficile, il est donc conseillé de définir un support expérimental limitant le frottement par exemple. Les incertitudes liées à l'acquisition et au traitement sont non négligeables. Une

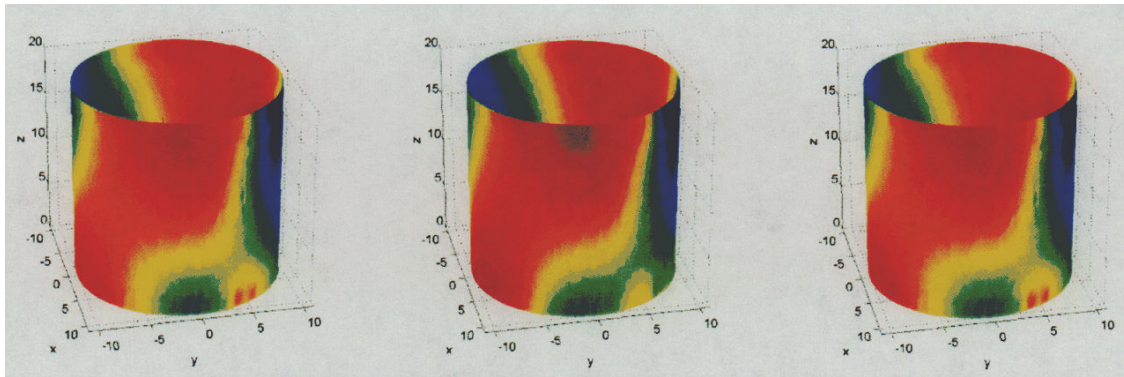


Figure 3.9 – Résultats obtenus par [Blaedel *et al.*, 2002]. A gauche : mesure sous chargement. Au centre : mesure avant chargement. A droite : résultat de simulation sous chargement.

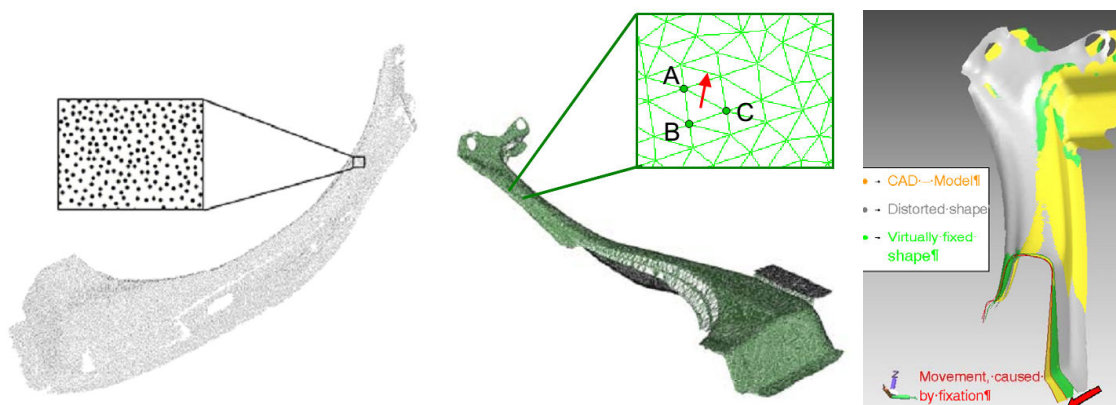


Figure 3.10 – Nuage de points de mesure et maillage *Eléments Finis* associé, et résultats de simulation [Weckenmann et Weickmann, 2006].

liste non-exhaustive de sources d'incertitude et de précautions à prendre pour les limiter est proposée (mesure, idéalisation de la géométrie, type et propriétés des *Eléments Finis*, identification des conditions aux limites, ...). Enfin, la connaissance des paramètres matériau a une importance majeure dans le résultat de simulation. Ils sont ici évalués expérimentalement par des essais classiques sur des éprouvettes (*module d'Young* et *coefficient de Poisson*).

[Hirata *et al.*, 2009] détaille un processus similaire à celui suivi par Blaedel, appliqué à la mesure de pare-brise de véhicules automobiles. Dans le cas présent la mesure s'effectue lorsque le composant est mis en position sur trois points d'appuis, l'objectif étant au final de déterminer la géométrie de ce même composant installé sur un support de géométrie différente (position et nombre des appuis différents).

Weckenmann fait le choix de construire un maillage *Eléments Finis* directement sur les points de mesure. Dans les travaux présentés dans [Weckenmann *et al.*, 2005] et [Weckenmann et Gabbia, 2006], les mesures des composants sont réalisées à l'aide d'un système par projection de franges, ce qui permet d'obtenir un très grand nombre de points de mesure. La construction d'un maillage *Eléments Finis* est donc réalisée directement sur ces points de mesure. On observe sur la Figure 3.10 que celui-ci est très dense, et pas optimisé pour le calcul *Eléments Finis*. Cela peut s'avérer coûteux en temps de calcul notamment.

La simulation de la géométrie à l'état libre est alors réalisée, en utilisant la position nominale des points d'appui. Dans [Weckenmann *et al.*, 2007] l'utilisation de la position réelle des appuis permet d'être plus proche de la réalité en terme de modélisation. Dans [Weckenmann et Weickmann, 2006] est également présenté un diagramme de causes et effets, attaché uniquement au système de mesure utilisé. L'expression *fixation virtuelle* est employée pour décrire le principe mis en œuvre.

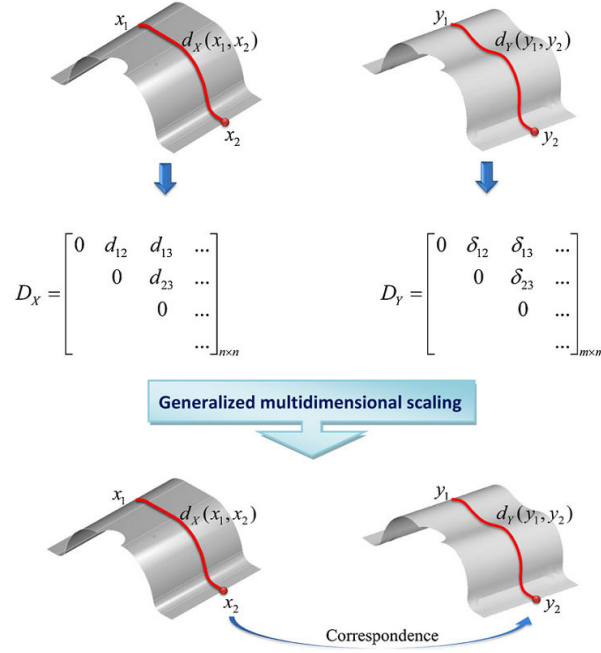


Figure 3.11 – Principe de recherche de correspondances entre deux géométries d’une même pièce dans deux configurations différentes [Radvar-Esfahlan et Tahan, 2012].

La stratégie suivie par [Jaramillo *et al.*, 2009] est différente, puisqu’elle s’appuie sur une déformation préalable du nominal afin de venir coller aux points de mesure. L’utilisation des *fonctions de base radiale* permet d’approximer la mesure et de simplifier la représentation *Eléments Finis*. [Jaramillo *et al.*, 2013] montre également que cette méthode permet de prendre en compte les trous de numérisation éventuels.

De la même manière [Radvar-Esfahlan et Tahan, 2012] procède à un recalage non-rigide en déformant le maillage sur les points de mesure. La méthode présentée est ensuite basée sur la notion de *distance géodésique* (chemin le plus court entre deux points, tracé sur une surface) afin de déterminer des correspondances entre deux géométries d’une même pièce dans deux configurations différentes. Le principe est détaillé sur la Figure 3.11. La *distance géodésique* entre deux points d’un composant reste constante malgré une déformation isométrique de celui-ci. Il est ainsi possible de comparer certaines caractéristiques de composants mesurés dans différentes configurations.

[Gentilini et Shimada, 2011] met en œuvre une méthode similaire. Il construit tout d’abord un maillage sur le nuage de points de mesure à la manière de [Weckenmann et Weickmann, 2006]. Il insère cependant dans le processus une opération de conversion de ce maillage afin de l’adapter à la simulation par *Eléments Finis*. Le modèle mécanique support de la simulation est d’abord recalé en comparant une géométrie théorique sous chargement à une géométrie réelle sous chargement identique. Dans ce cas la méthode de *calibration* des paramètres matériau repose fortement sur l’hypothèse de faible défaut de forme du composant vis-à-vis de l’amplitude des déformations. La géométrie théorique assemblée est alors simulée. Les résultats sont comparés à la géométrie de la forme réelle assemblée. Les résultats obtenus sur un cas d’application sont visibles sur la Figure 3.12.

L’auteur s’attache plutôt à caractériser les performances de la méthode mise en place en analysant les lignes de réflexion. Celles-ci sont visuellement assez proches sur les exemples présentés. Finalement l’auteur aborde assez peu la notion d’écart entre les deux géométries, stipulant que les résultats sont acceptables pour lui. L’écart moyen, entre la géométrie assemblée mesurée et la géométrie assemblée simulée, est de l’ordre du millimètre, pour une plaque de 550 mm × 150 mm.

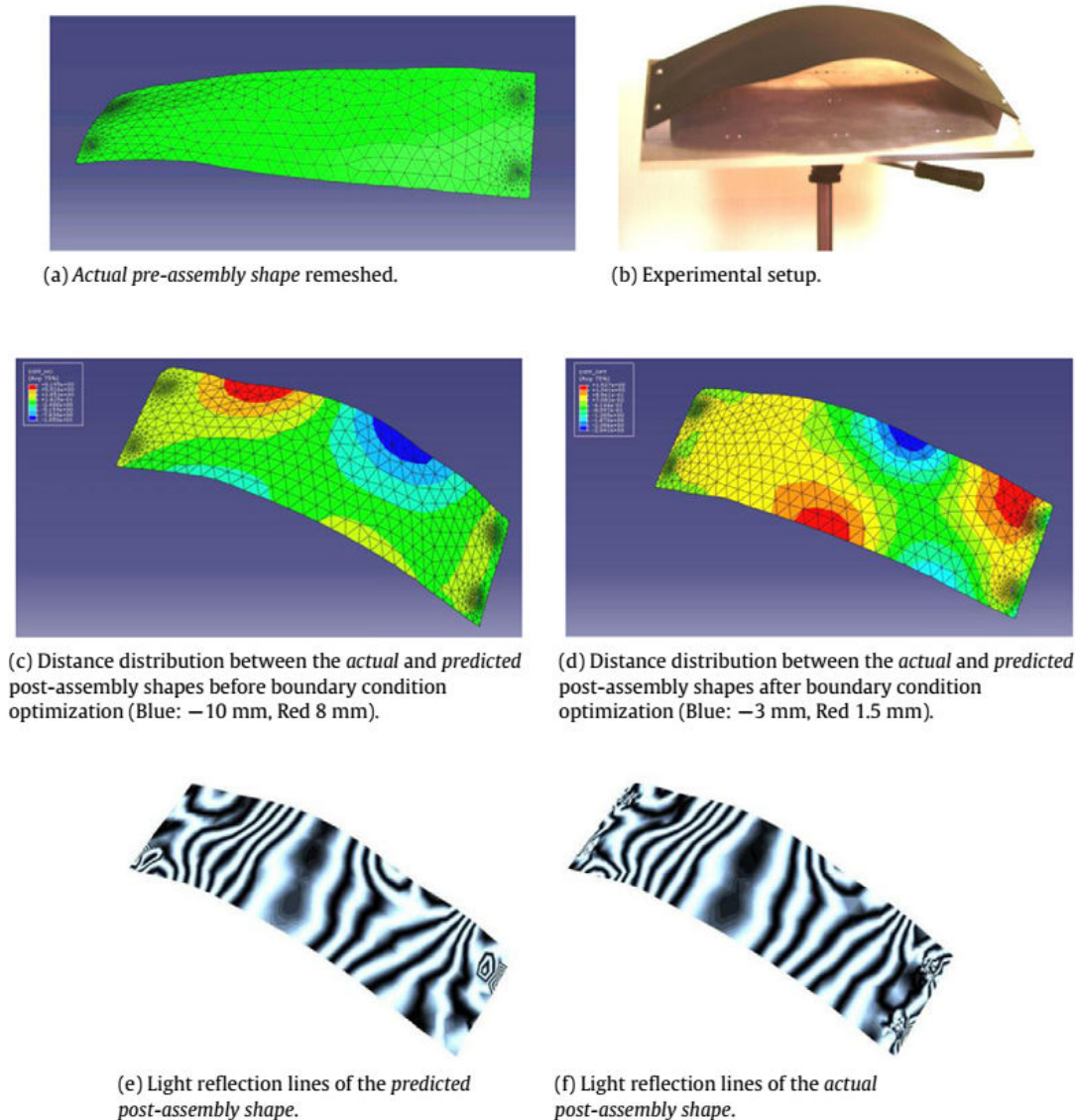


Figure 3.12 – Résultats de simulation de la géométrie assemblée [Gentilini et Shimada, 2011].

Les travaux de thèse de [Abenhaim *et al.*, 2013] détaillent la mise en œuvre d’une méthode analogue, avec pour objectif la déformation de la géométrie théorique contrainte pour correspondre aux mesures. Cette déformation est fonction de la configuration de mesure du composant et du nuage de points de mesure. Une contribution importante concerne la mise en place d’une méthode permettant d’exclure les données de mesure correspondant à des défauts locaux du composant et pas à sa déformée due à son environnement. Il est alors possible de procéder à la vérification du respect des exigences de forme. Dans [Abenhaim, 2009] l’auteur fournit d’ailleurs un état de l’art des techniques de mesure de composants souples sans support dédié.

[Lindau *et al.*, 2012] présente la mise en œuvre d’une méthode similaire sur un composant automobile. La géométrie de la forme réelle est mesurée dans une configuration peu contrainte (configuration de mesure), et la simulation permet de déterminer à partir de ces mesures la géométrie du composant dans une configuration très contrainte (configuration d’assemblage). Les résultats de simulation sont comparés à des résultats de mesures réalisées pour la seconde configuration. Les hypothèses formulées concernent les petites déformées et petits défauts de forme notamment. Un recalage des données de mesure dans le repère de la géométrie théorique contrainte est nécessaire avant de procéder à la simulation. Ce repère est

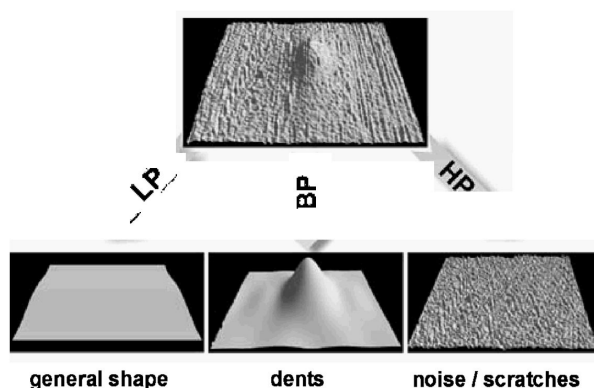


Figure 3.13 – Résultat de l’analyse fréquentielle [Denkena *et al.*, 2002].

construit à partir d’éléments du système de mise en position du composant, qui sont identifiés par la mesure. L’incertitude sur l’évaluation de la position de ces éléments est évaluée à $\pm 0.1mm$. Les résultats obtenus tablent sur un écart maximal entre mesure et simulation de l’ordre de $0.9mm$ pour une déformée appliquée entre les deux configurations d’amplitude maximale $3mm$ (ce qui représente 30%). L’écart moyen est de l’ordre de $0.2mm$ (ce qui représente 7%). Notons que les deux configurations étudiées sont hyperstatiques et relativement contraintes. [Abenhaim *et al.*, 2015] souligne de son côté la difficulté à simuler une déformée cohérente lorsque les configurations sont peu contraintes (pas de maintien en position des composants).

Enfin, [Lemes, 2010] réalise une analyse des incertitudes de mesure et de simulation, dans le contexte de validation de simulation de retour élastique par mesure optique de composants métalliques. Les causes principales d’incertitude de mesure proviennent selon lui de la stratégie de mesure et du choix des paramètres du système d’acquisition et de traitement. Il évoque également les défauts géométriques du composant. La cause principale d’incertitude liée à la simulation réside dans la modélisation de l’environnement du composant en accord avec la réalité, et notamment des conditions aux limites. La variation de la valeur des paramètres matériau est considérée comme peu influente. Finalement dans le cas de la simulation de retour élastique, les incertitudes liées à la mesure et à la simulation sont considérées comme équivalentes.

2.1.5 Représentation modale

La représentation modale est un outil dont le principe de base est le suivant : on cherche à représenter une géométrie quelconque à l’aide d’une combinaison linéaire de géométries, souvent plus simples. Ces géométries sont choisies de façon à obtenir au final une représentation approchée de la géométrie quelconque, mais en apportant des informations qui ne sont pas connues explicitement dans la géométrie initiale (représentations mathématiques, propriétés physiques, ...).

De nombreux travaux décrits dans la littérature s’appuient sur cette représentation. Tout d’abord [Denkena *et al.*, 2002] utilisent la *DFT* (*Discrete Fourier Transform*) pour exprimer les résultats de mesure d’une surface de composant souple obtenus à l’aide d’un système par projection de franges. La base de décomposition est alors définie par les différents coefficients de Fourier. Une analyse fréquentielle permet de séparer les données de mesure afin d’en extraire le bruit (très hautes fréquences), mais également la forme globale de la surface (basses fréquences) et les défauts locaux (moyennes et hautes fréquences), comme illustré sur la Figure 3.13. La difficulté réside principalement dans la définition d’une frontière entre les différentes zones fréquentielles.

Dans leurs travaux, [Huang et Ceglarek, 2002] choisissent d’utiliser une approche similaire, la *DCT* (*Discrete Cosinus Transform*). Elle est utilisée pour représenter des écarts de forme de surfaces planes à partir de données de mesure. Le principe reste le même, si ce n’est que les coefficients sont cette fois-ci

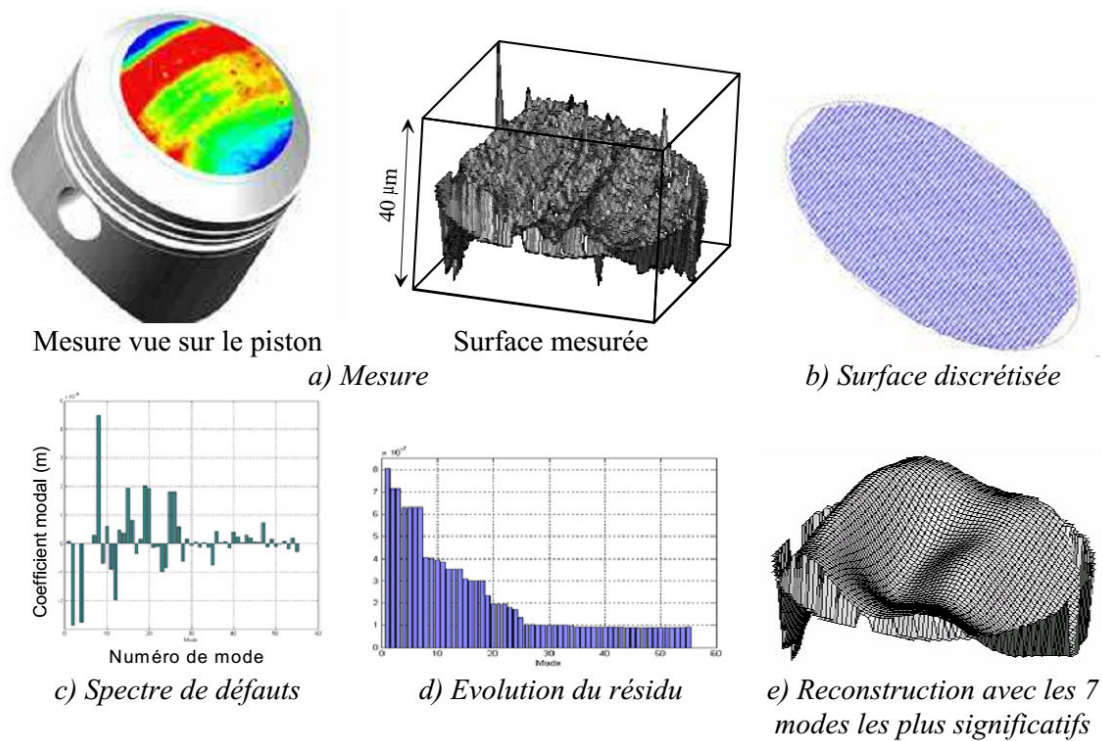


Figure 3.14 – Processus de décomposition modale appliqué sur un piston [Samper, 2007].

réels. Un indice de *compression d'énergie*, défini comme le ratio entre l'énergie exprimé par les modes utilisés pour la reconstruction et l'énergie totale du signal, permet de définir le nombre de modes nécessaires à la reconstruction. [Lecompte *et al.*, 2010] utilisent également la *DCT*, pour simuler des défauts d'usinage sur une surface.

Dans le cas de la *DFT* (*Discrete Fourier Transform*) et de la *DCT* (*Discrete Cosinus Transform*), il est important de noter que les géométries nominales sont relativement simples, c'est-à-dire que les contours sont rectangulaires. Il est difficilement envisageable de traiter des géométries plus complexes avec ces méthodes.

Ainsi [Samper et Formosa, 2007] et [Samper, 2007] optent pour des modes propres de vibration afin de générer la base dans laquelle va être réalisée la décomposition. Là encore la décomposition suit le même principe, détaillé sur un exemple en *Figure 3.14*. Cependant on peut noter les différents avantages de cette base de modes de vibration par rapport aux modes utilisés dans les méthodes précédentes. Tout d'abord ces modes sont intrinsèques à la géométrie, il est donc possible de réduire le nombre d'informations en transit au cours du processus en conservant simplement la contribution de chaque mode, et en recalculant éventuellement les modes si nécessaire. De plus ces modes sont facilement calculables à partir de maillages représentant la géométrie nominale, tous les logiciels de calcul par *Eléments Finis* offrant cette possibilité. Enfin, ils offrent la possibilité de combler les zones vides d'informations (trous de numérisation, ou zones où la qualité des points de mesure est relativement mauvaise) en faisant l'hypothèse que les modes de basse et moyenne fréquences ont un sens physique en terme de forme.

Dans la suite de ces travaux, [Favreliere, 2009] introduit la notion de mode technologique. Dans le cas où un suivi régulier de la production des composants est réalisé, il est alors envisageable d'introduire dans la base modale des modes représentatifs des défauts constatés régulièrement au cours des contrôles. Cela peut permettre d'abaisser le nombre de modes nécessaires à la reconstruction. [Stricher, 2013] procède de façon similaire pour générer des géométries de pièces avec défauts, caractéristiques des procédés utilisés pour leur fabrication. Ces modes technologiques peuvent être obtenus en combinant les modes naturels par exemple (en observant les contributions de chacun), ou en utilisant des outils mathématiques pour les générer.

La décomposition modale d'une géométrie dans une base de modes propres s'effectue de la manière suivante. La première opération consiste à définir la base modale associée à la géométrie étudiée. Dans le cas des modes propres, celle-ci est obtenue en résolvant l'équation d'équilibre dynamique (en petits mouvements, d'où la nécessité d'avoir une représentation de la géométrie de la forme réelle recalée correctement par rapport au nominal) :

$$\mathbb{M}\ddot{q} + \mathbb{K}q = 0 \quad (3.1)$$

avec \mathbb{M} la matrice de masse,
 \mathbb{K} la matrice de rigidité.

Les solutions de cette équation sont donc de la forme :

$$q_i = Q_i \cos(\omega_i t) \quad (3.2)$$

avec Q_i un vecteur d'amplitudes du mode i ,
 ω_i la pulsation associée.

Ainsi les modes naturels (ω_i, q_i) sont obtenus par résolution de l'équation :

$$\left(\mathbb{M}^{-1} \quad \mathbb{K} - \frac{1}{\omega_i^2} Id \right) q_i = 0 \quad (3.3)$$

La base modale est alors obtenue en classant dans une matrice les modes selon les ω_i croissants, qui vont correspondre dans l'ordre aux modes rigides (pour les six premiers, trois translations et trois rotations), puis aux modes de forme et ensuite d'ondulation. Ensuite il reste à effectuer la décomposition de la géométrie dans cette base modale. La géométrie se décompose dans la base modale ainsi formée, chaque mode ayant une contribution spécifique, selon la relation suivante :

$$V = Q\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i Q_i \quad (3.4)$$

avec V la géométrie à décomposer,
 n le nombre de modes,
 λ_i les contributions de chaque mode.

Il est nécessaire de décrire la géométrie à décomposer de façon à ce qu'elle se prête à cette décomposition. Si les modes sont exprimés de façon discrète à partir d'une analyse modale effectuée à l'aide d'un logiciel *Eléments Finis*, la géométrie devra être exprimée sous le même format. Ainsi un traitement préalable est nécessaire pour passer de la géométrie initiale brute (nuage de points de mesure, surface B-spline, ...) à une géométrie compatible avec le format de la base modale. La représentation modale prend tout son intérêt lorsqu'on utilise un nombre limité m de modes. Il est alors possible d'obtenir une géométrie V' approximée de la géométrie V initiale :

$$V' = \sum_{i=1}^m \lambda_i Q_i, m \ll n \quad (3.5)$$

avec V' la géométrie recomposée,
 m le nombre de modes utilisés pour la recomposition.

Il est alors possible de définir un vecteur *résidu de projection* dans la base tronquée à m vecteurs, ainsi qu'un scalaire *résidu de projection*, déterminés par les relations suivantes :

$$R(m) = V - V' = V - \sum_{i=1}^m \lambda_i Q_i \quad (3.6)$$

$$r(m) = \|R(m)\| \quad (3.7)$$

avec $R(m)$ le vecteur *résidu de projection*,
 $r(m)$ le scalaire *résidu de projection*.

En résumé cette méthode semble adaptée pour représenter une géométrie mesurée en filtrant certaines informations, telles que le bruit de mesure, en ne tenant pas compte des modes de très haute fréquence. Elle semble également adaptée à la prise en compte de défauts globaux (du moins si la discrétisation est bien choisie par rapport aux dimensions des défauts). Pour la prise en compte de défauts locaux, et notamment les défauts typiques des matériaux composites, il paraît cependant difficile de se limiter à l'usage d'une base de modes propres. L'introduction de modes technologiques pourrait être une solution.

Dans tous les cas la principale difficulté est de fixer un critère permettant de définir les modes qui sont nécessaires pour obtenir une représentation modale suffisamment proche de la représentation initiale. Les indices de *compression d'énergie* et de *résidu de projection* sont deux propositions de la littérature. Une méthode basée sur ce vecteur *résidu de projection* sera détaillée par la suite.

2.2 Synthèse

Concernant la mise en œuvre de supports de mesure de composants souples, l'état de l'art a mis en avant les enjeux économiques liés à l'utilisation de supports simples, modulaires et non dédiés. Les contraintes sont globalement les mêmes que pour la métrologie rigide classique, si ce n'est la nécessité d'imposer parfois des configurations hyperstatiques afin de limiter les déformations du composant et de garantir sa stabilité. Un compromis entre le nombre de points d'appuis et le respect de ces critères est alors nécessaire.

Il apparaît ensuite que la mesure sans contact est la plus adaptée à la mesure de composant souples. Les technologies par triangulation *LASER* ou par projection de franges, qui permettent d'acquérir un nombre important de points en très peu de temps, semblent très utilisées dans le domaine de l'aéronautique pour la mesure de composants souples de grandes dimensions. Le laboratoire étant équipé d'un tel système de mesure, celui-ci sera principalement utilisé lors de ces travaux.

De nombreux travaux traitent du recalage de nuages de points. Les méthodes de recalage par algorithme *ICP* ou à l'aide d'éléments de référence sont envisageables dans le contexte. L'analyse de la qualité des données et l'évaluation de critères permettent de caractériser les nuages de points numérisés. Il est alors possible d'évaluer des caractéristiques géométriques à partir de ces nuages de points, caractéristiques qui peuvent être locales ou globales.

Dans le contexte de mesure de composants souples, un recalage rigide ne suffit pas à placer le nuage de points de mesure dans une configuration qui permet l'évaluation d'une caractéristique par rapport à une caractéristique nominale. Il est nécessaire de passer par un recalage non-rigide, qui consiste soit à déformer le nominal et la spécification, soit le nuage de points de mesure. Cette déformation est généralement réalisée par simulation. Il est ainsi nécessaire de modéliser avec soin l'environnement du composant pour obtenir des résultats cohérents. La plupart des auteurs se contentent de supposer cette modélisation fidèle à la réalité. Très peu tentent de valider cette hypothèse. Elle est pourtant la clé de la performance de la méthode.

De nombreuses raisons font que les nuages de points de mesure peuvent être partiels. Parfois même le choix est fait de ne pas travailler avec l'intégralité des données lorsque celles-ci sont jugées de moins bonne

qualité. Cependant dans l'optique d'utiliser des maillages *Eléments Finis* comme support du recalage non-rigide, il est nécessaire de posséder des données en chaque noeud. Pour cela la décomposition modale de la géométrie mesurée est utilisée. Du fait de leurs avantages, les modes propres ont été choisis. La difficulté principale étant de fixer un critère d'arrêt généraliste permettant de définir le nombre de modes nécessaires. La limite éventuelle de cette méthode concerne la représentation de défauts propres aux matériaux composites.

Cet état de l'art a permis de souligner une problématique d'actualité dans le domaine scientifique, très en lien avec les problématiques industrielles dans le domaine de la fabrication ou de l'assemblage. Tous les auteurs sont d'accord sur la théorie, quel que soit l'objectif recherché, mais peu d'entre eux s'attachent à démontrer expérimentalement la validité de celle-ci. En effet, cette théorie est basée sur deux hypothèses principales qui concernent la capacité à évaluer par la mesure la géométrie réelle d'un composant dans une configuration donnée et la capacité à modéliser cette configuration afin d'en évaluer l'impact sur le composant par la simulation. La validation expérimentale sera ainsi l'objet du *Chapitre 5*.

Cet état de l'art a également permis de lister les causes potentielles d'incertitudes liées aux différentes étapes qui constituent le processus d'évaluation de la géométrie à l'état libre d'un composant souple. Ces causes d'incertitude sont ainsi classées en *Annexe A*, où l'on retrouve deux diagrammes de causes et effets concernant d'une part l'acquisition et d'autre part le traitement et la simulation. Ce choix de distinction permet notamment de traiter les incertitudes liées à l'évaluation de la géométrie de la forme réelle par la mesure d'un côté, et de traiter les incertitudes liées à la modélisation du réel et à la simulation numérique de l'autre côté. Ces diagrammes ne se veulent pas exhaustifs, mais ils recensent une grande partie des causes d'incertitude liées à la méthode qui va être détaillée par la suite.

Enfin, la modélisation des conditions de mesure étant la principale difficulté rencontrée par les différents auteurs, la *mesure par retournement* semble être un moyen novateur et pertinent d'obtenir une représentation de la géométrie à l'état libre du composant sans passer par une étape de simulation. Il sera ainsi intéressant d'utiliser la géométrie à l'état libre qu'elle permet d'évaluer afin de caractériser la géométrie à l'état libre obtenue par compensation des effets de l'environnement par la simulation.

Ainsi l'objectif des travaux présentés dans ce chapitre est d'illustrer le principe de cette méthode permettant l'évaluation de caractéristiques sur des composants souples en s'affranchissant des configurations de mesure des composants. Il est également question de détailler les hypothèses majeures sur lesquelles elle repose. Le détail de la mise en œuvre sur un exemple simple permettra d'illustrer les différentes notions et géométries abordées dans la théorie.

L'objectif est ici de travailler sur la mesure de la géométrie d'un composant souple monté sur son support de mesure rigide. L'étape suivante sera de raisonner sur la simulation, à partir de la mesure réalisée, de la géométrie de ce composant souple assemblé avec d'autres composants, le principe étant similaire.

3 Méthode d'évaluation de caractéristiques sur des composants souples

La procédure qui permet théoriquement d'obtenir une représentation de la géométrie d'un composant souple quelle que soit sa configuration est notamment détaillée dans [Lartigue *et al.*, 2006]. Les différentes géométries caractéristiques d'un composant souple, qu'on peut observer lors du cycle d'assemblage d'un produit, sont décrites (géométries des formes réelles ou géométries théoriques). Elles sont visibles sur la *Figure 3.15*.

On peut ainsi observer :

- ✚ La *géométrie théorique contrainte* ($E_{\text{contrainte,théorique}}$) : C'est la géométrie théorique à l'état assemblé ou sur support de mesure. Elle est définie dans l'environnement CAO.

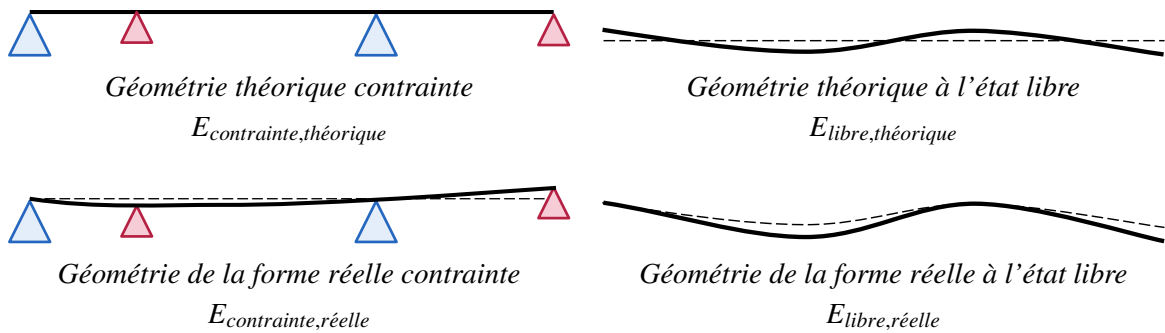


Figure 3.15 – Géométries caractéristiques d'un composant flexible d'après [Lartigue *et al.*, 2006].

- La *géométrie théorique à l'état libre* ($E_{libre, théorique}$) : C'est la géométrie intrinsèque théorique du composant souple, c'est-à-dire qu'elle est invariante. Elle est différente de la géométrie théorique contrainte, puisque la pièce n'est dans ce cas soumise à aucune contrainte. Il est possible de la simuler à partir de la *géométrie théorique contrainte*, en connaissant la configuration correspondante.
- La *géométrie de la forme réelle à l'état libre* ($E_{libre, réelle}$) : C'est la géométrie intrinsèque de la forme réelle de la pièce, c'est-à-dire avec défauts, soumise à aucune contrainte. Elle est définie dans l'environnement réel. Elle est en pratique impossible à observer puisqu'il faudrait que la pièce soit en apesanteur et en lévitation. C'est ce qu'on cherche à évaluer.
- La *géométrie de la forme réelle contrainte* ($E_{contrainte, réelle}$) : C'est la géométrie réelle de la pièce à l'état assemblé ou sur support de mesure. C'est la géométrie que l'on peut observer sur le poste d'assemblage.

Cette notion de géométrie, correspondant à un état géométrique particulier, et symbolisée par la lettre E , est un terme qui reste relativement général. En effet, sur le principe ces différentes géométries sont des objets qui peuvent être exprimés sous différentes formes. Dans la pratique il est nécessaire de substituer ces géométries par des modèles mathématiques ou par des représentations discrètes (par exemple par des *Skin model shapes*).

Tout au long de ce chapitre il sera souvent question de mesure et de simulation au niveau de *composant isolé*, en opposition à la notion de *composant assemblé*. Cependant la notion de *composant isolé* n'a de sens que lorsque celui-ci est considéré à l'état libre, c'est à dire lorsque l'environnement n'influe pas sur lui. Dans tous les autres cas, il s'agit en réalité d'un *composant assemblé*. Et notamment dans le cas d'un composant posé sur son support de mesure, on traite le cas particulier de l'assemblage d'un composant souple sur un sous-ensemble rigide. Il possède cependant des particularités, notamment au niveau des contacts avec le composant souple, qui sont considérés comme locaux et ponctuels, ce qui amène à le distinguer des assemblages de type aéronautique.

3.1 Principe de la méthode

Le principe de la méthode détaillée dans cette section correspond à la première phase décrite par [Blaedel *et al.*, 2002], visible sur la *Figure 3.8*, c'est-à-dire l'évaluation de la géométrie à l'état libre d'un composant souple par compensation des effets de l'environnement sur celui-ci par la simulation. Différentes applications sont alors possibles à partir de ce résultat, comme par exemple la vérification de spécifications. Dans le cas présent il s'agira de simuler l'assemblage de ce composant en intégrant cette géométrie évaluée par la mesure et la simulation.

La méthode ainsi mise en œuvre repose sur le principe général suivant : la *géométrie de la forme réelle contrainte* d'un composant souple peut être considérée comme la *géométrie de sa forme réelle à l'état libre*, sur laquelle s'appliquent les effets de l'environnement par l'intermédiaire d'une *déformée* (fonction de la

configuration du composant, des sollicitations mécaniques extérieures et de la gravité).

Sous l'hypothèse de petites déformée et de petit défaut de forme, la *géométrie de la forme réelle contrainte* d'un composant souple peut être considérée comme la *géométrie de sa forme réelle à l'état libre*, à laquelle s'ajoute la *déformée due à l'environnement qui le contraint*. Ce principe est régi par l'équation suivante :

$$E_{\text{contrainte,réelle},\mathcal{R}} = E_{\text{libre,réelle},\mathcal{R}} + \Delta E_{CLs+\vec{g},\text{réelle},\mathcal{R}} \quad (3.8)$$

avec $E_{\text{contrainte,réelle},\mathcal{R}}$ la *géométrie de la forme réelle contrainte* d'un composant souple,
 $E_{\text{libre,réelle},\mathcal{R}}$ la *géométrie de la forme réelle à l'état libre* de ce composant,
 $\Delta E_{CLs+\vec{g},\text{réelle},\mathcal{R}}$ la *déformée due à l'environnement qui le contraint*,
 \mathcal{R} le repère dans lequel sont exprimées les différentes géométries.

Ainsi afin d'évaluer la *géométrie de la forme réelle à l'état libre* d'un composant, il est ainsi nécessaire de déterminer la *géométrie de sa forme réelle contrainte* et de soustraire les effets de la configuration dans laquelle il se trouve, soit :

$$E_{\text{libre,réelle},\mathcal{R}} = E_{\text{contrainte,réelle},\mathcal{R}} - \Delta E_{CLs+\vec{g},\text{réelle},\mathcal{R}} \quad (3.9)$$

Il est nécessaire que les géométries soient exprimées dans un même repère pour pouvoir les composer. Il existe différents moyens pour définir ce repère commun \mathcal{R} , qui sont détaillés dans la *Section 3.2.2*. La *géométrie de la forme réelle à l'état libre* est alors également exprimée dans ce repère \mathcal{R} .

La *géométrie de la forme réelle contrainte* est physiquement observable, et peut donc être évaluée par la mesure. On obtient ainsi une représentation de la *géométrie de la forme réelle contrainte* par la mesure :

$$E_{\text{contrainte,mesurée},\mathcal{R}} \approx E_{\text{contrainte,réelle},\mathcal{R}} \quad (3.10)$$

La fidélité et la richesse d'information de cette représentation dépendront du moyen de mesure utilisé, mais aussi des conditions de mise en œuvre de ce système et du processus de traitement des données de mesure. Par nature cette représentation est discrète.

En ce qui concerne la *déformée due à l'environnement qui contraint le composant*, elle n'est pas observable directement, puisqu'elle n'est qu'une composante de la *géométrie de la forme réelle contrainte*. Il n'est donc pas possible de l'évaluer directement par la mesure. Il est ainsi nécessaire de l'évaluer par la simulation. On obtient alors une représentation de cette déformée réelle :

$$\Delta E_{CLs+\vec{g},\text{simulée},\mathcal{R}} \approx \Delta E_{CLs+\vec{g},\text{réelle},\mathcal{R}} \quad (3.11)$$

Là encore la qualité du résultat dépendra des paramètres de simulation choisis. Par la méthode des *Eléments Finis* il sera assez simple d'imposer une densité homogène à cette représentation. Cependant la qualité dépendra de nombreux paramètres de modélisation, à la fois géométriques (position des conditions aux limites, géométrie des zones de contact, ...) et mécaniques (paramètres matériau, frottement aux interfaces, ...). Il semble ainsi judicieux de définir un contexte expérimental qui garantisse une modélisation fidèle au réel.

En résumé, la mise en œuvre de la méthode décrite dans cette section consistera à résoudre l'*Equation 3.12*, à partir de l'évaluation des deux termes de droite par la mesure et par la simulation. L'objectif étant de limiter les écarts entre la *géométrie à l'état libre évaluée* et la *géométrie de la forme réelle à l'état libre*.

$$E_{\text{libre,évaluée},\mathcal{R}} = E_{\text{contrainte,mesurée},\mathcal{R}} - \Delta E_{CLs+\vec{g},\text{simulée},\mathcal{R}} \quad (3.12)$$

3.2 Hypothèses principales sur lesquelles repose la méthode

Afin de garantir la validité de la méthode présentée dans la section précédente, il est nécessaire de se placer dans un cadre respectant certaines hypothèses. La description de ces quelques hypothèses fait l'objet de cette section.

3.2.1 Petites déformées et petits défauts de forme

On considère dans cette étude que les déformations des composants restent dans le domaine élastique. On considère également que les déformées sont relativement faible vis-à-vis des dimensions des composants. La même hypothèse est émise concernant les défauts géométriques (notamment les défauts de forme).

Cela permet de considérer la géométrie théorique contrainte comme référence pour l'expression de la *géométrie de la forme réelle contrainte* évaluée par la mesure et de la *déformée due à l'environnement qui contraint le composant* évaluée par la simulation. Il est alors nécessaire de définir un repère au niveau de cette géométrie théorique contrainte, identifiable dans les deux environnements, pour exprimer les géométries dans un repère commun et permettre leur composition.

Sous cette hypothèse, cela permet aussi de supposer que les défauts géométriques et les déformées ont une influence négligeable sur la rigidité du composant. Il est alors possible de travailler avec la rigidité nominale, qui est évaluée une seule fois. Elle est utilisée afin de compenser les effets de l'environnement sur le composant, et ce quel que soit le défaut géométrique du composant, et quelle que soit la configuration du composant. Le non respect de cette hypothèse rendrait le problème plus complexe à traiter, car il serait nécessaire de procéder par itérations et actualiser à chaque pas de calcul la rigidité du composant, qui serait initialement la rigidité déterminée à partir de la *géométrie de la forme réelle contrainte* obtenue par la mesure.

Dans le cas de géométries nominales relativement complexes, comme pour des matériaux composites d'épaisseur variable, cette hypothèse a du sens puisque la géométrie, qui définit partiellement la rigidité, va permettre d'orienter celle-ci. Dans le cas de géométries nominales trop simples, des singularités peuvent apparaître. C'est potentiellement le cas lorsqu'on traite d'une géométrie nominale plane. La rigidité représente un comportement identique suivant les deux directions principales. Cependant le défaut de forme, aussi faible soit-il, vient modifier cette rigidité et rendre le comportement différent suivant les deux directions principales. Il est ainsi nécessaire de s'assurer que cet effet anisotropique reste négligeable, ou qu'il peut être pris en compte lors de la modélisation.

3.2.2 Repères d'expression des géométries

Il est nécessaire, pour pouvoir les additionner, que la *géométrie de la forme réelle contrainte* évaluée par la mesure et que la *déformée due à l'environnement qui contraint le composant* évaluée par la simulation soient exprimées dans un même repère. Ce repère peut être choisi de façon judicieuse afin de simplifier sa construction dans les environnements de la mesure et de la simulation.

Ce repère doit être construit à partir d'éléments qui sont définis à la fois dans les environnements de la mesure et de la simulation. Il peut alors s'agir d'éléments géométriques appartenant au composant (par exemple des trous) ou à son environnement (appuis qui permettent de positionner le composant ou référentiel externe). Dans le contexte de la mesure de composant souple, on choisira en priorité de construire ce repère à partir de la position des appuis. Il sera possible sinon d'utiliser la géométrie du composant (bords de pièce par exemple). Dans le contexte de la mesure d'assemblage de composants souples, il sera intéressant de définir ce repère sur un composant rigide de l'assemblage, ou sur un référentiel extérieur.

Dans l'environnement de mesure, les points mesurés sont définis initialement dans un repère $2D$ associé à la caméra CCD du capteur. Par triangulation ils sont ensuite transformés dans l'environnement $3D$ du capteur. Connaissant les caractéristiques géométriques du capteur (dimensions et orientation), ces points sont alors exprimés dans un repère propre au porteur.

Il est possible d'identifier, à partir des points de mesure, les entités géométriques qui vont permettre de construire le repère propre à la *géométrie de la forme réelle contrainte* évaluée par la mesure. Ce repère, construit à partir des mêmes entités géométriques que le repère commun construit sur la *géométrie théorique contrainte*, permet la transformation des données de mesure dans le repère commun. Cette transformation est soumise aux incertitudes d'évaluation des entités géométriques par la mesure et de construction du repère associé.

Dans l'environnement de la simulation, les noeuds appartenant au maillage déformé sont définis dans le repère lié au maillage de référence. Il est tout de même nécessaire de connaître la position théorique des éléments géométriques permettant de construire le repère associé. Ces éléments peuvent ne pas exister géométriquement au niveau de la représentation discrète, mais leur position doit être connue afin de permettre la construction du repère.

Dans le cas de l'utilisation d'éléments géométriques servant à la mise en position du composant (et sous réserve qu'ils soient fixes et rigides), la *déformée due à l'environnement qui contraint le composant* est facilement exprimable dans le repère commun puisque la déformée est nulle en ces points. Dans le cas où ce sont les bords de la pièce qui sont utilisés, il sera alors nécessaire de passer du repère construit sur la déformée à celui construit sur le maillage de référence.

Ceci s'applique dans le cas de géométries correspondant à une configuration donnée. Pour la comparaison de géométries évaluées dans des configurations différentes, il sera nécessaire d'exprimer au préalable l'une des géométries dans le repère attaché à la seconde.

3.2.3 Représentation homogène des géométries

Les représentations de la *géométrie de la forme réelle contrainte* et de la *déformée due à l'environnement qui contraint le composant* étant obtenues par la mesure et par la simulation, celles-ci sont intrinsèquement discrètes. Elles sont cependant de natures différentes.

Les données de mesure sont en effet relativement denses, de densité variable, bruitées et potentiellement incomplètes. Elles sont représentées par un ensemble de n points issus de la mesure, dont l'expression est résumée par l'Equation 3.13.

$$E^n_{\text{contrainte,mesurée},\mathcal{R}_{\text{commun}}(\text{mesure})} \longrightarrow \left\{ \begin{matrix} \overbrace{\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}}^3 \end{matrix} \right\} n_{\text{Points de mesure}} \quad (3.13)$$

avec $\mathcal{R}_{\text{commun}}(\text{mesure})$ le repère commun (correspondant à la configuration dans laquelle est positionné le composant), défini dans l'environnement de mesure.

Au contraire les données de simulation sont plutôt ordonnées, peu denses et complètes. Elles sont représentées par un ensemble de N noeuds qui appartiennent au maillage *Eléments Finis* qui permettra la prise en

compte du comportement flexible, et dont l'expression est résumée par l'Equation 3.14.

$$\Delta E_{CLs+\vec{g},\text{simulée},\mathcal{R}_{\text{commun}}(\text{simulation})}^N \longrightarrow \left[\begin{array}{ccc} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_N & Y_N & Z_N \end{array} \right] \Bigg\}^{N_{\text{Noeuds}}} \quad (3.14)$$

avec $\mathcal{R}_{\text{commun}}(\text{simulation})$ le repère commun (correspondant à la configuration dans laquelle est positionné le composant), défini dans l'environnement de simulation.

Afin de pouvoir comparer les deux représentations et remonter à la *géométrie à l'état libre évaluée*, il est impératif de respecter l'homogénéité des termes de l'Equation 3.12. Il est donc nécessaire de rendre les deux termes compatibles. Deux points de vue différents sont envisageables :

- Construire un maillage *Eléments Finis* directement sur les points de mesure. Dans ce cas le maillage obtenu est relativement dense, et le bruit issu de la mesure est conservé. Il est possible de filtrer les données de mesure avant de réaliser le maillage, ce qui permettra de réduire le bruit. Le maillage obtenu, qui sera le support de la simulation, reste cependant relativement désordonné. Il est également compliqué de générer un contour propre. Enfin, ce maillage devra être recalé dans l'environnement de simulation.
- Filtrer les mesures en fonction du maillage *Eléments Finis*. Dans ce cas le point de départ est un maillage défini sur la géométrie théorique contrainte. Les données de mesure sont dans un premier temps recalées par rapport à celui-ci. Il s'agit alors de filtrer les données de mesure afin de faire correspondre à chaque noeud du maillage nominal, un noeud qui sera l'image de la mesure. La méthode permettant de définir celui-ci sera décrite en détail dans la Section 4.3. La résolution et la régularité de la représentation sont ainsi maîtrisées dans l'environnement de simulation.

C'est la seconde possibilité qui sera retenue dans ces travaux. Elle permet en effet de construire un maillage *Eléments Finis* qui sera adapté aux objectifs de simulation. Les incertitudes relatives à la simulation seront limitées par l'utilisation d'un maillage de qualité. Le filtrage du bruit de mesure sera maîtrisé, et la résolution de la représentation sera pilotée par la densité du maillage *Eléments Finis*. L'Equation 3.15 permet de résumer ce choix de modélisation.

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{contrainte},\text{mesurée},\mathcal{R}_{\text{commun}}(\text{mesure})}^n \\ \Delta E_{CLs+\vec{g},\text{simulée},\mathcal{R}_{\text{commun}}(\text{simulation})}^N \end{array} \right\} \longrightarrow E_{\text{contrainte},\text{mesurée},\mathcal{R}_{\text{commun}}(\text{mesure})}^N \quad (3.15)$$

avec n le nombre de points de mesure,

N le nombre de noeuds de la représentation discrète du nominal,

sachant que $n \gg N$ lorsque la mesure est réalisée par numérisation *LASER*.

3.2.4 Limitation des incertitudes

La connaissance de la *géométrie de la forme réelle contrainte* nécessite une évaluation par la mesure, qui sera forcément source d'incertitudes. Concernant la *déformée due à l'environnement qui contraint le composant*, il s'agit d'une évaluation par la simulation, qui sera également entachée d'incertitudes. Limiter ces incertitudes permettra de garantir les performances de la méthode mise en place. D'ailleurs l'étude de sensibilité qui sera présentée dans le Chapitre 5 aura pour objectif de mettre en avant les paramètres sur lesquels il sera judicieux de veiller afin de limiter les incertitudes relatives à l'évaluation des deux termes.

Au delà de la maîtrise des incertitudes propres à l'évaluation des deux termes, la contrainte principale est de garantir une modélisation de l'environnement du composant lors de l'acquisition qui soit la plus fidèle

possible à la réalité. Il est en effet nécessaire que cet environnement soit bien modélisé afin d'en compenser correctement les effets sur le composant mesuré. Afin de se placer dans des conditions qui permettent de vérifier cette hypothèse, il sera ainsi judicieux de choisir une configuration de mesure relativement simple (nombre d'appuis limités, contact ponctuels, ...) qui pourra être modélisée fidèlement. L'objectif est de minimiser les erreurs liées à la modélisation de l'environnement.

La problématique de propagation des incertitudes de mesure au travers de la simulation n'est pas abordée dans ces travaux. Cependant il est important d'avoir à l'esprit que les incertitudes liées aux mesures pourraient avoir un impact non négligeable sur le résultat de simulation.

3.3 Nature des défauts et déformées représentables

Le choix de la densité de représentation, imposée par la densité du maillage, va conditionner la nature des défauts géométriques et des déformées qu'il sera possible de représenter. Dans les faits, cette discrétisation a une importance vis-à-vis de la géométrie qu'on cherche à représenter, mais également du processus de simulation.

Concernant la simulation, il s'agit de choisir une discrétisation suffisamment fine afin de pouvoir représenter les déformées qui seront mises en jeu par les configurations de mesure dans un premier temps, et d'assemblage ensuite. Ce qui va guider le choix de cette densité, c'est donc principalement le nombre et la position des conditions aux limites auxquelles sera soumis le composant au cours des processus de mesure et d'assemblage. On cherchera le plus possible à tracer un maillage régulier afin de se placer dans de bonnes conditions de calcul. Dans le contexte de l'assemblage aéronautique, il est également nécessaire de garder à l'esprit le besoin de minimiser la densité de représentation, afin de ne pas allonger les temps de calcul lors du passage à la simulation d'assemblage.

Concernant la géométrie qu'on cherche à représenter, et plus précisément la résolution des défauts géométriques recherchés, il semble à première vue judicieux de maximiser cette densité. Il s'agit donc de trouver un compromis.

Il est nécessaire de définir les défauts potentiels des composants qui sont mesurés en vue de simuler leur assemblage. Il s'agira de composants de formes élancées, sur lesquels on viendra acquérir la géométrie aux interfaces notamment. Les zones concernées seront relativement étendues, c'est à dire qu'on les considérera toujours comme des surfaces. Il sera alors question de la représentation de défauts globaux (défaut de forme, d'orientation, de position de la surface, ...) et de défauts locaux (impact, rayure, marche, ...).

La norme [ISO 8785, 1998] définit six ordres suivant lesquels il est possible de classer les différents défauts :

- ✦ Les premier et deuxième ordres correspondent aux défauts de *taille* et de *position*. Ce sont les défauts les plus facilement représentables. Le nombre de points d'évaluation nécessaire est faible. Ainsi dans le contexte la densité de représentation sera toujours suffisante pour représenter ces défauts.
- ✦ Les troisième et quatrième ordre correspondent aux défauts de *forme* et d'*ondulation*. Il est nécessaire d'augmenter le nombre de points d'évaluation afin de pouvoir représenter ces défauts. On parlera d'ondulation lorsque la période des défauts sera relativement importante. Ce qui va limiter la possibilité de représenter de tels défauts va ainsi être la longueur d'onde du défaut en question. Le nombre de points d'évaluation doit être fixé en fonction de celle-ci.
- ✦ Les cinquième et sixième ordres correspondent à la *rugosité* et à la *micro-rugosité*. Il ne seront pas pris en compte dans cette étude, car ils n'ont pas de réel intérêt dans l'optique de la simulation d'assemblage en vue du calage. De plus le système d'acquisition utilisé ne permettrait pas de les observer.

Derrière toutes ces définitions se cache la notion de longueur d'onde. Généralement, plus la longueur d'onde d'un défaut diminue, plus son amplitude est faible et plus il est nécessaire d'augmenter la résolution de mesure afin de pouvoir l'observer. Dans ces travaux il sera question de représenter des défauts de relative grande longueur d'onde. Ainsi seront considérés les défauts de *taille*, de *position*, de *forme* et certains défauts d'*ondulation*. La limite sera imposée par la densité de points d'évaluation.

La norme [ISO 12780-2, 2011] conseille de se référer, pour le choix d'un intervalle d'échantillonnage, au théorème de Nyquist, qui est le suivant : « *Si l'on sait qu'un signal infiniment long ne contient aucune longueur d'onde inférieure à une longueur d'onde spécifiée, le signal peut être reconstruit à partir des valeurs du signal à des intervalles régulièrement espacés pourvu que l'intervalle soit plus petit que la moitié de la longueur d'onde spécifiée* ». Plus concrètement, afin d'obtenir une représentation qui soit fidèle du défaut observé, la norme préconise une densité de représentation choisie qui permet de garantir l'évaluation d'au moins sept points par longueur d'onde. Reste à savoir quelle est la longueur d'onde des défauts typiques des composants de structure aéronautique.

La norme aborde la notion de défaut, mais pas de déformée. La mesure étant réalisée dans ces travaux sur la *géométrie de la forme réelle contrainte*, qui présente à la fois un défaut géométrique et une déformée, on supposera que l'ensemble défaut plus déformée doit suivre les préconisations de la norme. Dans ce cas, lorsqu'on souhaitera observer les ondulations des déformées potentielles, il suffira d'observer la géométrie des premiers modes de vibrations contraints dans la configuration de mesure.

Sur des composants métalliques élancés de type poutre ou plaque, les défauts typiques qui peuvent avoir un impact dans le contexte du calage restent d'ordre relativement faible. En effet, il s'agira principalement de défauts de *forme* et d'*oscillation* de faible longueur d'onde. C'est principalement le procédé de fabrication du composant qui imposera cette longueur d'onde.

La plaque qui fera l'objet de l'illustration de la méthode a par exemple été laminée et cintrée. Intrinsèquement ces deux procédés génèrent des défauts géométriques qui peuvent s'apparenter à un défaut de forme cylindrique perpendiculaire à la direction de laminage. Pour des composants de structure, du fait des dimensions importantes de ces composants, et de leur relative souplesse, il s'agira de prendre en compte un défaut de relative grande longueur d'onde auquel s'ajoutera une déformée d'une longueur d'onde inférieure. Une poutre usinée sur trois appuis présentera ainsi un défaut de longueur d'onde caractéristique du procédé d'usinage ainsi qu'une déformée qui présentera deux oscillations.

Sur des composants composites, on retrouve des défauts de formes qui sont liés au procédé de fabrication également. Ils sont potentiellement différents du métallique mais restent de longueur d'onde équivalente. On peut par exemple citer des défauts liés au phénomène de *spring-back* en sortie d'autoclave, tels que des vrillages ou des cintrages. Cependant, à ces défauts de longueur d'onde faible, s'ajoutent des défauts locaux de type marche (variation brutale d'épaisseur). Ces défauts sont typiques des composants de structure aéronautique composites, et ont un impact fort dans le contexte du calage aéronautique. Ils sont cependant très difficiles à prendre en compte, puisqu'il est nécessaire d'augmenter fortement la densité de la représentation.

La méthode mise en œuvre semble ne pas être adaptée, sous cette forme, pour la représentation de défauts de ce type. Deux pistes sont envisageables afin de les intégrer à la représentation :

- Augmenter globalement la densité du maillage *Eléments Finis*. Il est toutefois nécessaire de s'assurer qu'une représentation dense ne conservera pas un bruit de mesure trop important, qui pourra être nuisible aux performances du calcul *Eléments Finis*. La problématique du coût de calcul méritera également d'être étudiée.
- Augmenter localement la densité du maillage *Eléments Finis*. Il serait intéressant de pouvoir identifier la position de ces défauts géométriques à partir des données de mesure brutes (étude de la courbure discrète par exemple) et ainsi remailler seulement localement au niveau de ces zones. Cela permettrait de trouver un compromis entre finesse de représentation et temps de calcul.

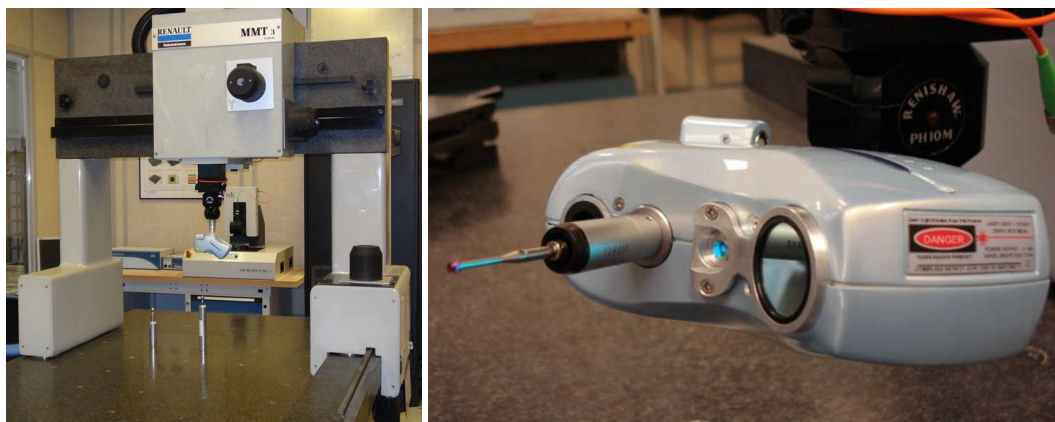


Figure 3.16 – Système de mesure utilisé.

En résumé, tant que les mesures seront réalisées sur des matériaux métalliques, la procédure sera celle décrite dans ce chapitre. Pour le passage au composite il sera nécessaire d'ajuster le méthode de représentation. Cet ajustement n'est pas traité dans ces travaux.

4 Illustration de la méthode

L'objectif de cette section est d'illustrer, sur un exemple relativement simple, le principe de la méthode d'évaluation de caractéristiques sur des composants souples. Le système de mesure qui a été utilisé au cours de ces travaux est présenté, ainsi que le support qui va permettre d'illustrer la mise en œuvre et les différentes notions abordées. Ensuite sont décrites les opérations de mesure de la *géométrie de la forme réelle contrainte* et de simulation de la *déformée due à l'environnement qui contraint le composant*.

4.1 Système de mesure utilisé

L'état de l'art réalisé concernant l'acquisition de la géométrie de composants souples et de formes complexes a mis en avant les avantages de l'utilisation de systèmes de mesure optiques afin d'acquérir un grand nombre de points par la mesure sans contact du composant. Le choix du matériel d'acquisition s'est ainsi orienté vers cette technologie.

La tête de numérisation *LASER Kreon*, montée sur un support motorisé *Renishaw*, lui-même supporté par un portique de machine à mesurer tridimensionnelle, est visible sur la *Figure 3.16*. Le support motorisé permet d'orienter le capteur à 360° autour de la normale au marbre de la machine, et entre -105° et +105° autour des autres axes, afin de permettre une grande flexibilité d'utilisation. Le capteur est composé principalement d'un émetteur *LASER* et d'une caméra *CCD*. Il est éventuellement possible de monter un palpeur à contact sur le capteur optique.

Son principe de fonctionnement est le suivant : le *LASER* émet un faisceau de points alignés, qui vient balayer la surface qu'on souhaite numériser. Ensuite par triangulation, comme cela est schématisé sur la *Figure 3.17*, la distance entre le point d'émission du *LASER* et le point mesuré est calculée. En effet, la distance a est connue (distance entre le point d'émission du laser et le centre de l'objectif de la caméra *CCD*), ainsi que l'angle γ (angle définissant l'orientation du faisceau *LASER*). Ensuite l'angle β est déterminé pour chaque point en fonction de sa position dans le champ de vision de la caméra *CCD*. Il est alors possible de calculer la distance b (distance entre le point d'émission du *LASER* et le projeté de ce point sur la pièce) correspondant à cette configuration, qui est calculée de la façon suivante (en utilisant la relation d'*Al-Kashi*) :

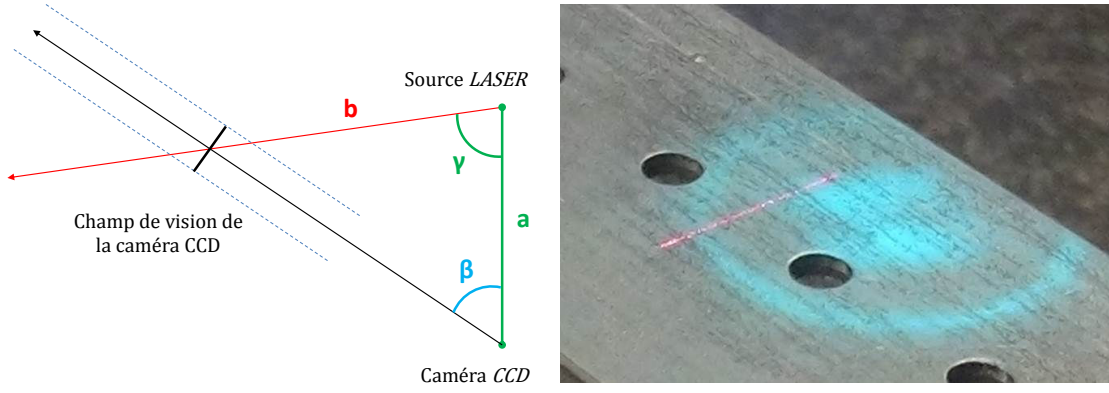


Figure 3.17 – Principe de triangulation et ligne *LASER* émise par le capteur.

$$b = \frac{(a \sin \beta (\cos \gamma - \cos \beta \sin \gamma))}{((\cos^2 \gamma - \sin^2 \beta))} \quad (3.16)$$

Il suffit alors d'ajouter aux coordonnées du point courant de la machine à mesurer tridimensionnelle les coordonnées du vecteur définissant l'orientation de la tête *LASER* et la distance b suivant la direction du faisceau *LASER* pour obtenir les coordonnées du point mesuré sur la pièce dans le repère du capteur. Ce calcul est réalisé pour chaque point de la ligne *LASER*, et pour chaque position de cette ligne lors de la numérisation, afin d'obtenir au final un nuage de points représentatif de la géométrie mesurée.

4.2 Support de démonstration

Dans le cadre de ces travaux de thèse, les premières expérimentations ont été menées sur le support qui va être brièvement présenté dans cette section. Afin de ne pas être redondant avec la partie concernant la validation expérimentale, le choix a été fait d'utiliser ce support seulement dans un but d'illustration de la méthode mise en œuvre.

Les expérimentations ont principalement été réalisées sur des composants de type plaque (nominalement plane ou mono-courbure). La géométrie de ces composants est relativement simple, et se rapproche de la géométrie de certains composants souples présents dans les assemblages de structure comme les peaux de fuselage. Ces plaques sont posées sur un support de démonstration, visible sur la *Figure 3.18*, dont la principale caractéristique est sa modularité. Elle a permis notamment de pouvoir faire varier les configurations de mise et de maintien en position des composants lors de la mesure.

Le support est considéré comme rigide, ainsi que tous les éléments modulaires qui serviront à la mise et au maintien en position des composants. Chaque appui bombé permet de réaliser une liaison ponctuelle unilatérale avec le composant. Le nombre d'appuis utilisés, et la position de ceux-ci, permettent d'imposer une configuration de mise en position particulière. Trois plots latéraux permettent de positionner les plaques dans le plan. Ainsi avec trois appuis unilatéraux non-colinéaires il est possible de réaliser une mise en position isostatique. Lorsqu'on ajoute un appui unilatéral supplémentaire (un quatrième appui pour soutenir le composant, ou un appui mobile pour déformer la plaque), la mise en position devient hyperstatique. Du fait de la technologie utilisée pour réaliser des appuis bilatéraux et de l'épaisseur non nulle des composants, on considère que les configurations qui en comportent sont également hyperstatiques. En effet, du fait de leur grande flexibilité, dans les faits les panneaux aéronautiques sont maintenus sur les outillages de manière le plus souvent hyperstatique. Il est ainsi nécessaire de considérer également des mises en position hyperstatiques dans notre étude.

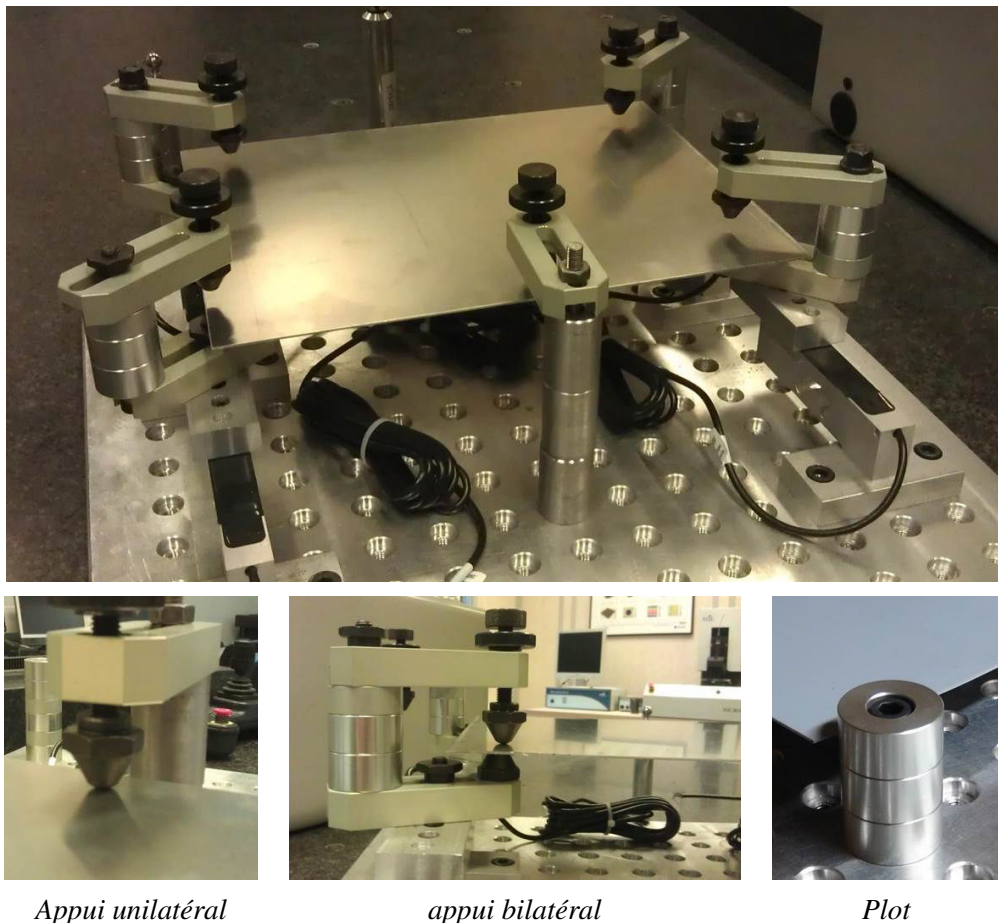


Figure 3.18 – Montage modulaire permettant de placer les plaques dans leur configuration de mesure.

Il a également été envisagé de réaliser des relevés d'efforts en parallèle des mesures de géométrie. Pour cela il est possible de monter sous les appuis des capteurs d'effort. Ceci permet notamment, lorsque la mise en position sera hyperstatique, de relever la valeur des efforts générés aux points d'appui. Cela permet également d'alimenter le processus de recalage de modèle avec des données en effort en plus des données géométriques. La *Figure 3.19* illustre les différentes perspectives qu'offrent ce support expérimental.

Les capteurs permettent d'acquérir un effort suivant une direction, normale à la face supérieure de celui-ci. Leur géométrie se rapproche de celle d'un parallélogramme, ce qui permet de conserver une direction de mesure verticale malgré la déformation du capteur. C'est cette déformation justement, mesurée à l'aide de jauges, qui permet de remonter à la valeur de l'effort exercé. Les jauges de déformation sont positionnées par paire de part et d'autre du capteur, dans le sens longitudinal et dans le sens transversal. Le traitement des données relevées à l'aide d'un *pont de Wheatstone* permet d'extraire la seule valeur de l'effort tranchant suivant une direction.

Le principal inconvénient concernant l'utilisation de ce type de capteurs dans le contexte de mesure de composants souples concerne leur relative souplesse. En effet, la technologie impliquant une déformation du capteur lui-même, il est nécessaire prendre en compte cette déformation dans le processus d'évaluation de la géométrie du composant souple. Cet aspect de mesure d'effort a ainsi été laissé de côté dans ces travaux, mais il représente une perspective très intéressante dans le but d'améliorer le recalage de modèle.

La méthode va ainsi être illustrée à partir de la mesure d'une de ces plaques dans une configuration de mesure particulière.

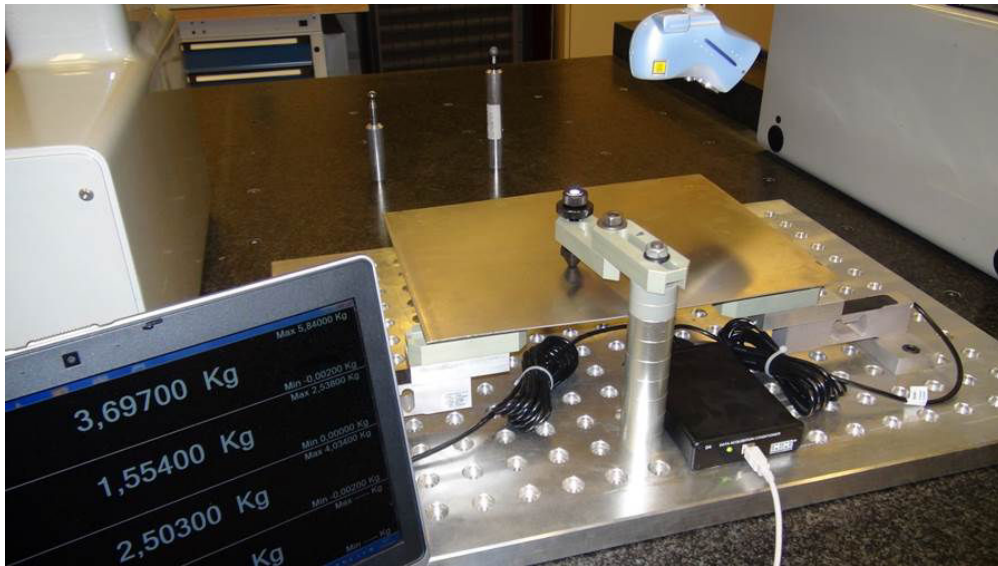


Figure 3.19 – Acquisition simultanée de la géométrie de la plaque et des efforts au niveau des appuis.

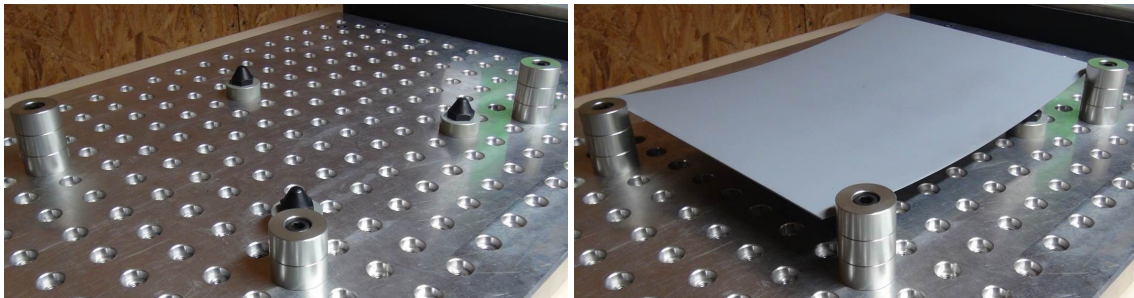


Figure 3.20 – Configuration isostatique de mesure de la plaque mono-courbure.

4.3 Evaluation de la géométrie de la forme réelle contrainte par la mesure

La plaque choisie pour l'illustration est une plaque en aluminium mono-courbure de $300 \times 400\text{mm}$, d'épaisseur nominale 1.5mm et de rayon de courbure nominal 1100mm . La mise en œuvre de la méthode est détaillée dans un cas relativement simple. Comme souligné lors de l'état de l'art, il est nécessaire de définir un nombre d'appuis suffisants et un positionnement adapté pour permettre une mise en position complète du composant, et garantir sa stabilité. Dans le cas de composants souples, on peut éventuellement chercher à minimiser la déformée. La configuration de mesure choisie ici est isostatique, c'est-à-dire que la plaque est posée sur trois appuis bombés réalisant trois ponctuelles unilatérales. La *Figure 3.20* illustre cette configuration de mesure.

4.3.1 Acquisition

Il s'agit alors de réaliser l'acquisition de la géométrie du composant dans sa configuration de mesure. Il est généralement nécessaire de définir une stratégie de mesure adaptée. Dans le cas présent, une trajectoire de numérisation est programmée afin de réaliser une numérisation par balayage sur le composant, visible sur la *Figure 3.21*. L'orientation du capteur n'est pas optimale sur toute la surface du composant. En effet, le matériel utilisé ne permet pas de modifier l'inclinaison du capteur lors du balayage, mais la faible courbure du composant permet de supposer que cela n'a que peu d'influence sur la qualité des données de mesure obtenues. Il serait possible de réaliser des mesures avec différentes orientations du capteur, mais les incertitudes de recalage des données de mesure seraient probablement plus importantes.

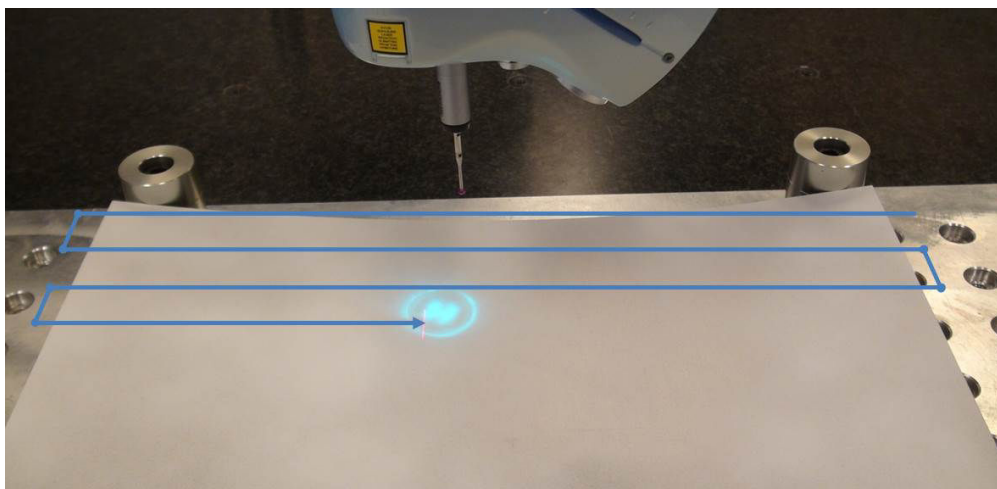


Figure 3.21 – Trajectoire de numérisation de la géométrie de la forme réelle de la pièce.

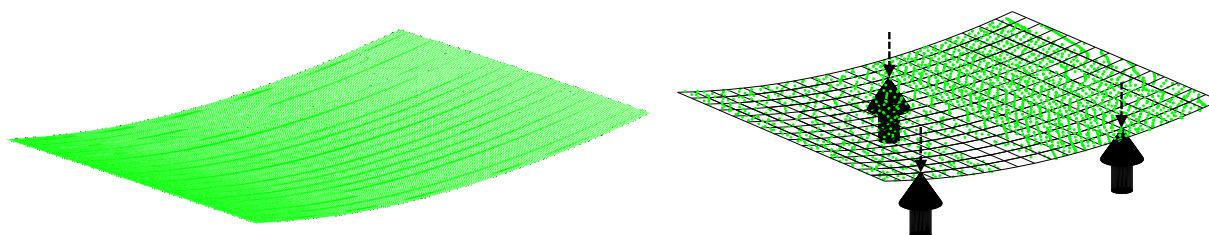


Figure 3.22 – Nuage de points obtenu par la mesure (environ 2.5 millions de points). Nuage de points recalé par rapport au maillage de référence (représentation de 1 point sur 2000).

De la numérisation résulte un nuage de points, correspondant à la géométrie du composant souple dans sa configuration de mesure, visible sur la *Figure 3.22*. Il est possible d’observer sur ce nuage de points une densité variable, des points appartenant à d’autres entités géométriques (support notamment), et éventuellement des trous de numérisation. De plus chaque numérisation mène à un nuage de points différent, pourtant représentatif de la même géométrie. C’est à partir de données de mesure de ce type que commence la phase de traitement.

4.3.2 Traitement

Il est nécessaire de réaliser une opération de pré-traitement afin de préparer les données. Dans ce cas il est souvent question de supprimer les points aberrants appartenant à d’autres entités géométriques. Pour cela la géométrie de référence est utilisée lorsque cela est possible. Dans le cas de composants souples, à géométrie variable, cela est plus compliqué. Il faut alors déformer préalablement la géométrie de référence, ce qui ajoute une étape au processus. La méthode mise en œuvre permet de s’affranchir de la suppression préalable de ces points aberrants.

Une opération de filtrage est habituellement nécessaire afin de rendre les données de mesure homogènes, cette variation de densité étant principalement due au recouvrement des passes de numérisation, visibles sur la *Figure 3.22*. Dans le cas présent il n’est pas nécessaire de réaliser un filtrage préalable pour conserver un nombre suffisant de points de mesure. La non homogénéité des points de mesure n’est pas un problème lors de la mise en œuvre de la méthode qui va être détaillée, puisque celle-ci va permettre de réaliser le filtrage des données de mesure.

La première étape consiste à recalcr le nuage de points de mesure par rapport à une géométrie de référence. Pour cela plusieurs méthodes peuvent être utilisées. En prenant trois points particuliers sur la géomé-

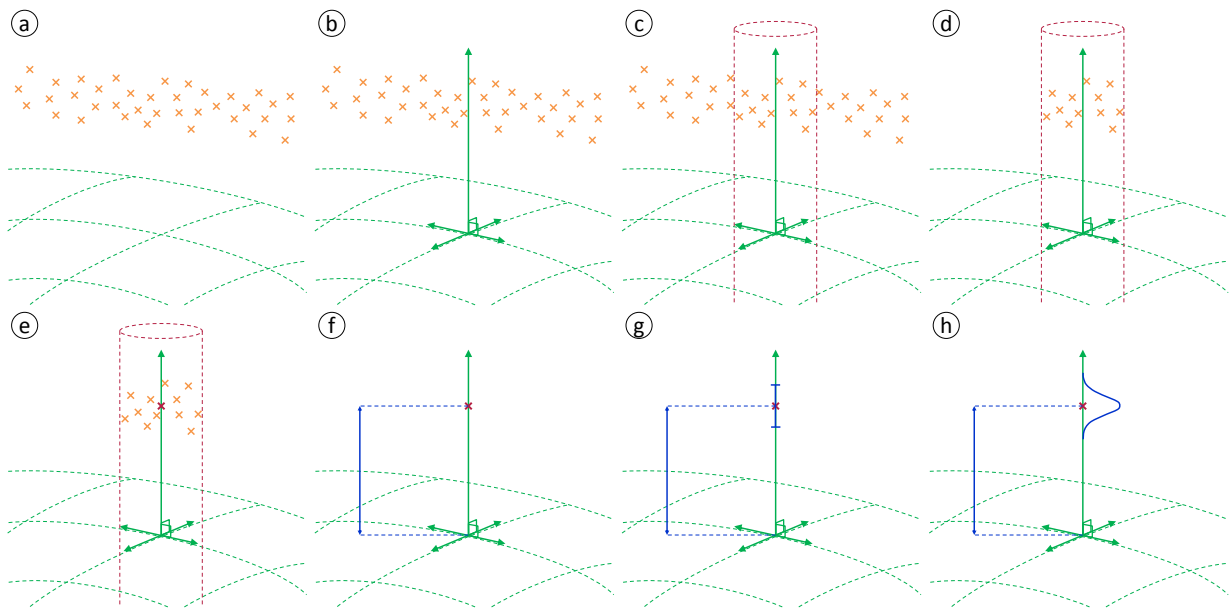


Figure 3.23 – Illustration des différentes étapes de la méthode de filtrage.

trie nominale, et en identifiant ces trois points à partir des données de mesure, il est possible de réaliser un recalage rigide du nuage de points sur la géométrie nominale en faisant correspondre ces points. La qualité du recalage rigide dépend dans ce cas du choix pertinent de ces trois points, et de l'incertitude liée à l'évaluation de ces trois points à partir des données de mesure. Trois points sur les bords de la surface numérisée peuvent facilement être identifiés, mais la qualité des données de mesure à cet endroit est souvent moins bonne. Il s'agit donc de trouver le bon compromis.

Il est également possible de procéder à un recalage de type *ICP* lorsqu'il n'est pas possible d'identifier précisément trois points particuliers. Dans ce cas un recalage préliminaire permet de recaler de façon grossière le nuage de points par rapport à la géométrie de référence. Ensuite il s'agit d'évaluer les distances entre les points du nuage et la géométrie nominale, et de réaliser une minimisation de ces écarts au sens des moindres carrés. Cependant dans le cas d'un composant souple, la géométrie réelle peut être très éloignée de la géométrie théorique contrainte, du fait de la déformée due à l'environnement. Le résultat du recalage rigide de type *ICP* perd alors son sens physique. Dans ce contexte il sera ainsi préférable de s'appuyer sur des points particuliers pour réaliser le recalage rigide. L'idéal serait de pouvoir évaluer la position réelle des trois points d'appuis. Ici trois points aux coins de la plaque ont été choisis.

Dans le contexte, le nuage de points est beaucoup plus dense que le maillage qui représente le nominal. Il s'agit alors de filtrer le nuage de points de mesure afin de rendre les deux représentations de la géométrie homogènes. L'idée est ainsi d'évaluer, pour chaque noeud de la géométrie nominale discrète, la distance avec le nuage de points de mesure. Il n'existe pas de point particulier correspondant exactement, il est donc nécessaire de définir un point moyen à partir des points qui sont autour de lui. La forte densité de points de mesure permet de sélectionner un groupe de points conséquent dans une zone restreinte autour de ce point théorique.

Concrètement la méthode de filtrage, illustrée sur la *Figure 3.23*, est la suivante :

- ✦ Un recalage rigide du nuage de point de mesure (*jaune*) par rapport à la géométrie de référence discrétisée (*vert*) a été réalisé (*a*).
- ✦ Pour chaque noeud du maillage de référence, on évalue la normale à la géométrie (*b*). Celle-ci est évaluée directement sur la géométrie discrète, en considérant la normale en un noeud comme la moyenne des normales aux éléments qui se partagent ce noeud, pondérées par l'aire des éléments.

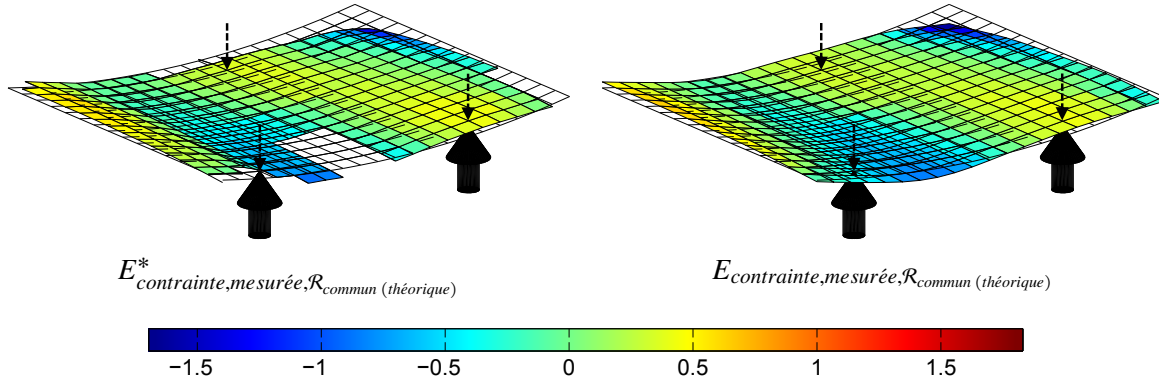


Figure 3.24 – Géométries construites à partir des champ d'écarts partiel et champ d'écarts extrapolé évalués (écarts en mm, amplitude facteur 10).

Cette hypothèse est valable sur des surfaces continues et sans arêtes.

- On construit virtuellement un cylindre infini le long de cette normale (c), et on vient sélectionner les points de mesure qui sont à l'intérieur de ce cylindre (d). Un *kd-tree* a été construit au préalable pour parcourir le nuage de points de façon plus rapide. La sélection des points se fait en comparant le résidu de la projection sur la normale de la distance noeud du maillage - point de mesure au rayon du cylindre. Celui-ci est choisi en fonction de la densité des deux représentations et de la courbure de la géométrie. En effet, il faut s'assurer que suffisamment de points seront sélectionnés, ce qui donnera plus de sens à la distance moyenne évaluée. Lorsque la courbure de la surface est importante, il est nécessaire de réduire le rayon pour ne pas sélectionner de points trop éloignés. Dans le cas présent, le rayon choisi est de l'ordre du millimètre.
- A partir des points sélectionnés il est alors possible d'évaluer un point moyen (e) qui va permettre de définir une distance entre ce point moyen et le noeud de la géométrie de référence discrétisée (f). L'ensemble de ces distances évaluées en chaque noeud va permettre de générer un champ d'écarts, orienté par les normales aux noeuds du maillage de référence.

L'expression de la géométrie de la forme réelle contrainte évaluée par la mesure se fait alors en appliquant ce champ d'écarts aux noeuds du maillage de référence, comme résumé par l'Equation 3.18. On obtient alors une représentation discrète de cette géométrie, qui sera de même dimension que la représentation de la géométrie de la déformée due à l'environnement qui contraint le composant. Celle-ci est visible sur la Figure 3.24.

$$E_{contrainte,mesurée,R_{commun} (théorique)} \longrightarrow \left\{ \begin{matrix} \overbrace{\begin{bmatrix} X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X'_N & Y'_N & Z'_N \end{bmatrix}}^3 \end{matrix} \right\} N_{Noeuds} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} X' & Y' & Z' \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}_i + D_i * \begin{bmatrix} U & V & W \end{bmatrix}_i \quad (3.18)$$

L'évaluation d'un point moyen à partir des points sélectionnés à l'intérieur du cylindre infini permet d'obtenir d'autres informations. Lorsque le nombre de ces points est suffisant, l'évaluation d'un plan défini au sens des moindres carrés permet d'obtenir une normale représentative de l'orientation locale réelle de la géométrie.

A partir de ces points inclus dans le cylindre infini, on est également capable d'évaluer des critères tels que l'étendue (g) ou l'écart-type (h) des distances entre ces points de mesure et le noeud du maillage correspondant. Cela permet entre autre de localiser des zones où les données de mesure ne permettent pas

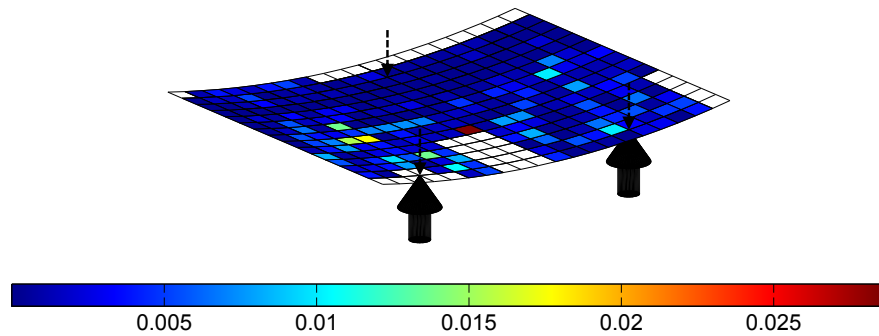


Figure 3.25 – Cartographie du bruit de mesure évalué lors du filtrage (écarts-types en mm).

d'obtenir une valeur d'amplitude du champ d'écarts fiable (pas assez de points de mesure, zone bruitée, points de mesure aberrants...). En effet, l'écart-type, image du bruit de numérisation (δ), est censé être relativement homogène sur l'étendue de la géométrie. Les valeurs trop importantes (facteur deux ou trois par rapport à la valeur moyenne de 0.0015mm) correspondent à des données de mesure acquises sur des bords de pièce ou lorsque la configuration de mesure n'est pas optimale (reflet du *LASER* sur la caméra *CCD*). Les valeurs trop faibles (inférieures à 20% de la valeur moyenne) correspondent à des zones où les points de mesure au voisinage d'un noeud sont trop peu nombreux. Dans ces deux cas les données au niveau de ces zones ne sont pas prises en compte afin de garantir une qualité du champ d'écarts partiel reconstruit. Sur la *Figure 3.25* est visible une cartographie du bruit de numérisation évalué.

Il est ainsi rare de pouvoir associer à chaque noeud un point moyen évalué à partir de données de mesure. Dans ce cas il est nécessaire de pouvoir combler ce manque d'information au niveau de la représentation de la géométrie mesurée. En effet, afin de pouvoir simuler le comportement du composant à partir d'un maillage *Eléments Finis*, il est nécessaire que celui-ci soit complet. Les déformées des composants pouvant être importantes, il n'est pas envisageable de conserver la position nominale des noeuds pour lesquels il n'y a pas de données de mesure utilisables. La représentation modale permet alors d'extrapoler l'information connue aux noeuds où le champ d'écarts a été évalué vers les zones vides d'information. Le principe est le suivant :

- ✦ On évalue les modes propres discrets non-contraints à partir de la représentation *Eléments Finis* de la plaque.
- ✦ On construit la base modale mode par mode, en prenant le soin d'ajouter des modes \mathbb{K} -orthogonaux afin de garantir l'unicité de la décomposition modale.
- ✦ On projette ensuite l'amplitude du champ d'écart sur cette base modale et on en déduit les contributions de chaque mode, conformément à ce qui est décrit dans la *Section 2.1.5*.
- ✦ On reconstruit la géométrie par superposition modale, et on évalue aux noeuds dont le champ a une amplitude, les écarts résiduels entre la géométrie initiale et la géométrie recomposée.
- ✦ Lorsque les écarts résiduels sont inférieurs à une certaine valeur, on stoppe la recomposition modale. Sinon on ajoute un mode supplémentaire et on recommence les deux opérations précédentes.

Les résultats de la décomposition modale, appliquée au champ d'écarts évalué précédemment, sont illustrés sur la *Figure 3.26*. On observe une signature modale propre à la *géométrie contrainte mesurée* partielle, puisqu'elle a été évaluée à partir du champ d'écarts partiel obtenu. Celui-ci permet de déterminer la signature modale (λ_i) propre à la *géométrie contrainte mesurée*. Les écarts entre la recomposition modale et le champ d'écarts partiel initial permettent de déterminer le nombre m de mode nécessaires. L'*Equation 3.19* permet de résumer ces propos.

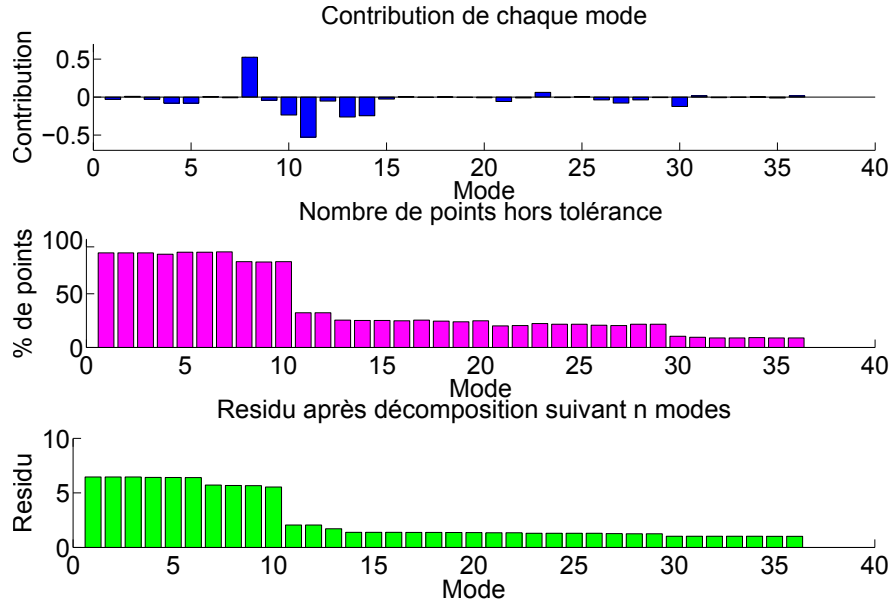


Figure 3.26 – Résultats de la décomposition modale. De haut en bas : contribution de chaque mode, nombre de points hors tolérance après recombinaison modale avec n modes et résidu associé.

$$E_{\text{contrainte,mesurée},\mathcal{R}_{\text{commun}}(\text{théorique})}^* = \sum_{i=1}^m \lambda_i Q_i^* + R(m)^* \quad (3.19)$$

avec $E_{\text{contrainte,mesurée},\mathcal{R}_{\text{commun}}(\text{théorique})}^*$ la géométrie contrainte mesurée évaluée aux noeuds pour lesquels on a pu associer des données de mesure,

Q_i^* les modes de la base de projection évalués au niveau de ces noeuds,

m le nombre de modes tel que $R(m)^* < V_{\text{critère d'arrêt}}^*$.

On peut supposer que cette signature modale est la même pour la géométrie complète. Cette hypothèse a un sens si on suppose qu'il n'y a pas de défaut local au niveau de la pièce, défaut qui aurait pu ne pas être mesuré lors de l'acquisition. Dans ce cas on peut définir le champ d'écart complet représentatif de la géométrie contrainte mesurée à partir de la signature modale déterminée, appliquée aux modes complets.

$$E_{\text{contrainte,mesurée},\mathcal{R}_{\text{commun}}(\text{théorique})} = \sum_{i=1}^m \lambda_i Q_i \quad (3.20)$$

La principale difficulté consiste à choisir quand stopper la recombinaison modale, et selon quel critère. Le terme $V_{\text{critère d'arrêt}}^*$ de l'Equation 3.19 définit ce critère d'arrêt. Afin de donner un sens physique à cette recombinaison, les écarts résiduels sont comparés à une valeur qui est imposée, au niveau de chaque noeud, en fonction des indices de qualité évalués à partir des points présents dans le cylindre infini. Concrètement lorsque l'écart résiduel est compris dans l'intervalle $[-3\sigma; 3\sigma]$ (σ étant l'écart-type des distances aux points de mesure permettant d'évaluer une distance moyenne en chaque noeud), on considère qu'il est acceptable. On suppose ainsi qu'en dessous de cette valeur il n'est pas possible de juger ou non de la qualité de la représentation modale. Les écarts résiduels $R(m)^*$ entre le champ d'écarts initial et le champ d'écarts reconstruit à l'aide des modes sont visibles sur la Figure 3.27.

La reconstruction de la géométrie est alors effectuée à l'aide des modes et des contributions ainsi déterminées. La géométrie ainsi recomposée est visible sur la Figure 3.24. A ce stade la représentation de la géométrie réelle évaluée par la mesure a été filtrée afin de procéder à la comparaison avec la géométrie de

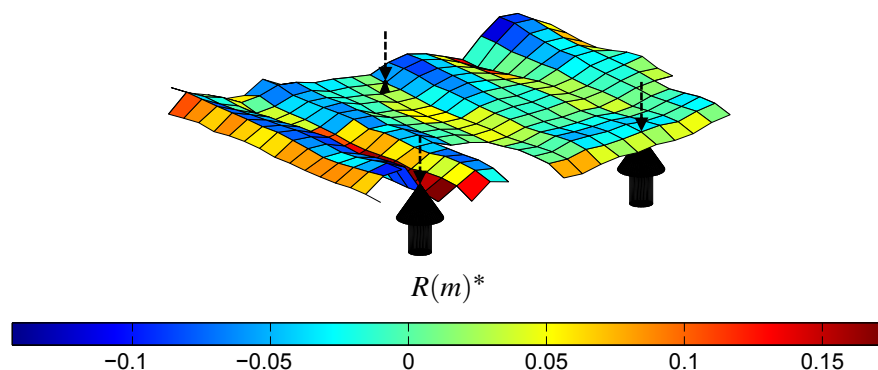


Figure 3.27 – Ecarts résiduels entre le champ d’écarts initial et le champ d’écarts reconstruit à l’aide des modes (écarts en mm, amplitude facteur 100).

la *déformée due à l’environnement* qui contraint le composant. L’évaluation de cette dernière fait l’objet de la section suivante.

4.4 Evaluation de la déformée due à l’environnement qui contraint le composant par la simulation

La représentation de la géométrie réelle d’un composant à l’état libre nécessite ensuite une phase de simulation par *Eléments Finis* afin d’évaluer la *déformée due à l’environnement* qui contraint ce composant. La procédure est détaillée ici à partir d’un maillage choisi arbitrairement.

4.4.1 Modélisation de la géométrie du composant

Dans le domaine industriel aéronautique, des phases préliminaires de simplification et d’idéalisations de la géométrie sont réalisées, avant de pouvoir réaliser une simulation d’assemblage. Cela permet aux experts de la simulation de travailler sur des modèles de composants plus simples, et de pouvoir passer à l’échelle de l’assemblage sans faire exploser les temps de calcul.

Dans l’optique de simuler l’assemblage des composants et d’évaluer le jeu entre eux, il n’est pas nécessaire de modéliser toutes les entités géométriques du composant. Cela permet de simplifier grandement le maillage qui sera utilisé. Dans le cas d’un composant de structure tel qu’un panneau raidi, lors du passage à la simulation, certains éléments géométriques tels que les raidisseurs ou encore les trous qui permettront le passage des éléments de fixation disparaissent. Au final il s’agit donc de mailler une géométrie simplifiée. Dans le cas présent, la géométrie de la pièce réelle est déjà extrêmement simple car elle ne présente ni trous ni raidisseurs. Le maillage tracé est visible dans la section précédente, notamment sur la *Figure 3.22*.

Ce maillage doit être optimisé en vue du calcul par *Eléments Finis*. On cherchera ainsi dès que possible à utiliser un maillage régulier. Il doit permettre de représenter la déformée du composant quel que soit l’environnement. Il doit également tenir compte des caractéristiques géométriques mesurées qu’on souhaite intégrer à la simulation de comportement. Dans le cas présent la densité de maillage a été choisie arbitrairement afin d’illustrer le processus. Il a été tracé afin de garantir le passage d’un noeud proche de la position théorique de chaque appui.

Le maillage choisi est un maillage surfacique, c’est-à-dire que les éléments qui le composent sont des éléments 2D. Ainsi seule une surface extraite de la peau de la pièce est maillée. On lui associe un modèle de type *coque* afin de pouvoir modéliser le volume du composant. Il est alors nécessaire de faire une hypothèse concernant l’épaisseur de la pièce. Pour une plaque métallique laminée, supposer une épaisseur constante est une hypothèse cohérente, la variation d’épaisseur potentielle étant de toute façon inférieure à l’incertitude

de mesure. Pour un composant réalisé dans un matériau composite, cette hypothèse est plus difficilement vérifiable.

4.4.2 Modélisation de la configuration de mesure

Il est nécessaire de modéliser l'environnement dans lequel se trouve le composant lors de sa mesure, c'est-à-dire les chargements et conditions aux limites qui s'appliquent réellement sur le composant lors de sa mesure. Cette modélisation est un élément clé pour évaluer de manière suffisamment fidèle la *déformée due à l'environnement* qui contraint le composant par la simulation. En ce qui concerne les chargements appliqués au composant, il s'agit généralement :

- ✈ De la pesanteur qui s'applique globalement sur le composant, et qui est définie par une intensité et une direction.
- ✈ Des efforts ponctuels générés par des éléments de maintien en position sous effort imposé, tels que des appuis réglables asservis en effort. Ces efforts sont définis ponctuellement par une intensité et une direction.
- ✈ Des efforts répartis générés par des éléments de maintien en position sous effort imposé, tels que des ventouses qui permettent de supporter le poids d'un composant. Ces efforts sont définis sur une surface par un champ d'intensité et une direction.

Dans le cadre de ces travaux, le raisonnement suivi a été de considérer des supports expérimentaux relativement simples du point de vue géométrique et technologique, afin de limiter dans un premier temps les erreurs liées à la modélisation de ces éléments. Ainsi dans l'optique de la validation de la méthode les seuls chargements utilisés seront les deux premiers, pesanteur et efforts ponctuels.

Les conditions aux limites correspondent à tous les éléments de l'environnement qui contraignent géométriquement le composant. Dans le contexte de l'assemblage aéronautique il s'agit généralement :

- ✈ Des conditions aux limites locales de type ponctuelle unilatérale. Il s'agit de la condition la plus simple en terme de modélisation et à réaliser expérimentalement. Elle est définie par un point d'application et une direction correspondant au blocage d'un degré de liberté en translation suivant un sens. Au vue des efforts mis en jeu, ce qui se passe localement au niveau de la zone de contact n'est pas pris en compte dans ces travaux.
- ✈ Des conditions aux limites locales de type ponctuelle bilatérale. Elle est définie par un point d'application et une direction correspondant au blocage d'un degré de liberté en translation dans les deux sens. Sa modélisation se rapproche de celle de l'appui ponctuel unilatéral, cependant sa réalisation matérielle est plus complexe. En effet, elle est réalisée physiquement par deux appuis en vis-à-vis, et la difficulté majeure réside dans le positionnement relatif des deux appuis afin de ne pas générer un couple lors du serrage. De plus du fait de l'épaisseur non nulle du composant, un moment résiduel est généré dès que la surface du composant n'est plus perpendiculaire à l'axe de la liaison.
- ✈ Des conditions aux limites locales plus complexes. Elles sont définies par un point d'application et plusieurs degrés de liberté bloqués simultanément. Prenons l'exemple d'un centreur dans un trou cylindrique. Il est modélisé par deux degrés de liberté en translation bloqués. Seulement dans les faits il est réalisé par un contact cylindre - cylindre qui, du fait de l'épaisseur non nulle des composants, engendre notamment des moments résiduels dans deux directions, qui correspondent normalement à deux degrés de liberté en rotation.
- ✈ Des conditions aux limites globales de contact unilatéral. Elles sont généralement définies sur une surface par des conditions de contact, avec jeu éventuel, et avec non-interpénétration entre les composants. Un maillage de la connexion de contact permet de faire le lien entre les noeuds des deux maillages en vis-à-vis.

- ✦ Des conditions aux limites locales de contact sous effort imposé. Elle sont définies par une condition de contact entre deux noeuds, sous une certaine condition d'effort. Elles modélisent les éléments de fixation tels que les épingles de pré-assemblage ou les rivets. Concrètement si l'effort défini est suffisant pour amener les deux géométries au contact, il y a alors contact entre les deux noeuds sur lesquels est imposée la condition. Si l'effort n'est pas suffisant, il n'y a pas de contact mais les géométries sont tout de même déformées.

Dans l'optique de la validation de la méthode d'évaluation de la géométrie de composants souples, les conditions aux limites mises en œuvre dans ces travaux sont principalement des conditions aux limites locales de type ponctuelle unilatérale afin de limiter les erreurs liées à la modélisation de l'environnement. En effet, les expérimentations mettant en œuvre des ponctuelles bilatérales notamment ont souligné les difficultés de modélisation.

Les conditions aux limites globales de contact unilatéral et les conditions aux limites locales de contact sous effort imposé concerneront plus particulièrement la simulation d'assemblage.

Dans le cas présent, les trois appuis qui permettent de maintenir la plaque sont modélisés par des ponctuelles unilatérales. Sur le support expérimental, les trois degrés dans le plan sont supprimés à l'aide de trois cylindres lors du positionnement. Ces cylindres ne restent pas en contact avec le composant lors de la mesure afin qu'ils n'aient pas d'influence sur sa géométrie.

4.4.3 Modélisation du comportement mécanique

Un modèle mécanique élastique isotrope est choisi afin de modéliser le comportement du composant. Ce modèle semble adapté dans le cas d'un composant métallique soumis à des sollicitations relativement faibles.

La première difficulté consiste à définir les paramètres qui caractérisent le matériau. En effet, comme détaillé dans la *Section 3.1.2*, il existe des méthodes de recalage de modèle qui permettent, à partir de différentes mesures, d'évaluer la valeur des paramètres du modèle qui permettent de faire correspondre le résultat de simulation aux mesures. Dans ce chapitre, la simulation est réalisée à partir des paramètres nominaux, l'objectif étant simplement d'illustrer la méthode de compensation des effets de l'environnement. La problématique d'évaluation de paramètres matériau réalistes sera abordée plus en détail dans le *Chapitre 5*.

Au delà des paramètres matériau, d'autres phénomènes peuvent être pris en compte, tels que le frottement au niveau des points d'appui ou les déformations locales. Dans le cas présent aucun de ces éléments n'est pris en compte.

4.4.4 Simulation numérique et compensation

La simulation *Eléments Finis* permet alors de simuler la déformée due aux contraintes exercées sur le composant par l'environnement extérieur. Celle-ci est visible sur la *Figure 3.28*. Du fait de la relative rigidité de la plaque, l'amplitude de cette déformée est relativement faible. Elle est également dissymétrique, du fait de la dissymétrie du système de mise en position. Elle reste relativement faible dans la zone des points d'appui, et augmente au niveau des coins de la plaque.

Il s'agit alors de soustraire cette déformée à la géométrie contrainte évaluée par la mesure. La géométrie obtenue, qui correspond à la géométrie à l'état libre évaluée, est visible sur la *Figure 3.29*. La comparaison avec la géométrie contrainte évaluée par la mesure visible sur la *Figure 3.24* montre que les coins de la plaque, notamment le coin arrière gauche, se redressent.

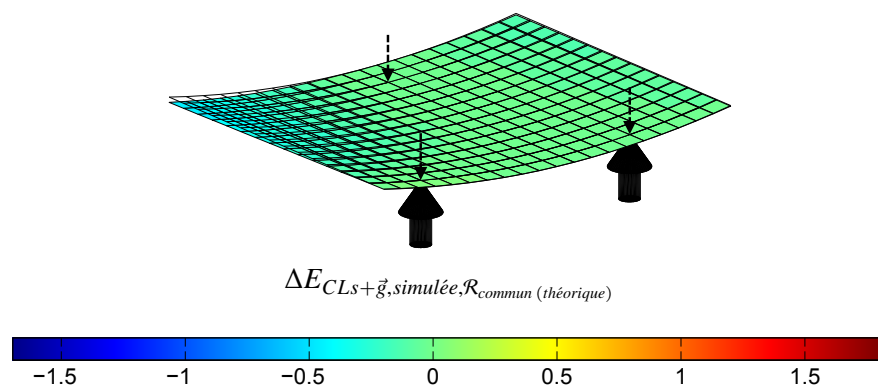


Figure 3.28 – Géométrie représentative de la déformée simulée correspondant à la configuration de mesure (écarts en mm, amplitude facteur 50).

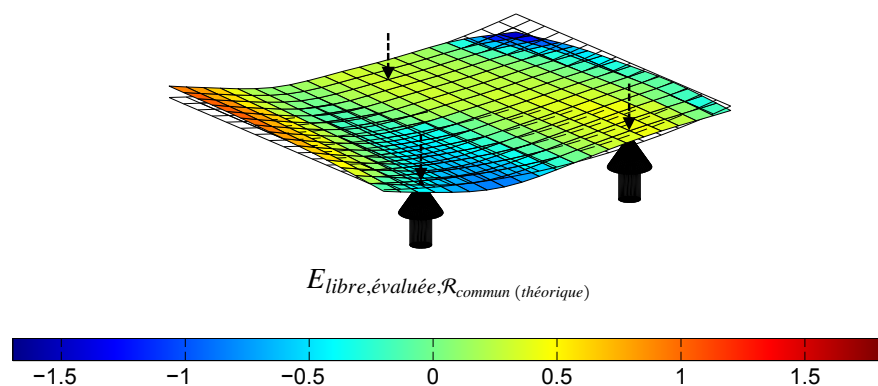


Figure 3.29 – Géométrie à l'état libre obtenue par la méthode de compensation des effets de l'environnement par la simulation (écarts en mm, amplitude facteur 10).

4.5 Synthèse

Les précédentes sections ont permis d'illustrer le processus d'évaluation de la géométrie de composants souples. Il est cependant difficile d'estimer la pertinence du résultat obtenu. En effet, la *géométrie à l'état libre* obtenue est fortement dépendante des hypothèses posées au départ, et notamment celles concernant la modélisation des paramètres de simulation fidèles au réel. Il serait nécessaire de pouvoir comparer cette *géométrie à l'état libre* à une géométrie de référence.

La possibilité d'utiliser un artefact de référence a été envisagée. Cependant pour obtenir un tel artefact, qui soit donc souple, et qui soit certifié à l'état libre, on se retrouve face aux mêmes problèmes. Il serait nécessaire de simuler de façon relativement fine le processus de réalisation de celui-ci afin de prévoir l'impact qu'il aura sur la géométrie finale de la pièce souple, et donc sur sa *géométrie à l'état libre*. Cette solution n'a donc pas été retenue.

La sensibilité du résultat obtenu vis-à-vis de la variation des différents paramètres de mesure et de simulation peut aider à la qualification de la méthode mise en œuvre. [Romdhani, 2014] réalise une étude des causes et effets concernant l'évaluation par la mesure de la position d'un point, à l'aide d'un bras poly-articulé. Les paramètres jugés les plus influents sont sélectionnés, afin de réduire le diagramme construit initialement. Une modélisation géométrique du système de mesure, prenant en compte tous les paramètres jugés influents, est proposée. Une analyse de sensibilité par une méthode de *Monte-Carlo* est réalisée, en faisant varier les paramètres géométriques retenus. Cela permet de pondérer les influences de chacun des paramètres jugés les plus influents sur la variation de la position du point mesuré.

Dans le cas présent, il s'agit de modéliser la fonction qui permet de passer d'un nuage de points bruts,

image de la *géométrie contrainte* mesurée, à un champ d'écarts représentatif de la *géométrie à l'état libre*. La modélisation de cette fonction nécessite la prise en compte des environnements de mesure et de simulation, ce qui rend cette tâche relativement complexe. Le nombre important de paramètres jugés influents (plus d'une vingtaine), ainsi que leur nature disparate, est un frein à la mise en œuvre de l'analyse de sensibilité par une méthode de *Monte-Carlo*.

Les méthodes de *Screening*, qui consistent à faire varier un paramètre à la fois, et à observer l'impact sur le résultat, semblent intéressantes dans le contexte de ces travaux de thèse. La variation de la *géométrie à l'état libre* obtenue est cependant difficile à interpréter vis-à-vis de la variation du paramètre étudié. Il est possible d'étudier la variation moyenne, la variation maximale, ou encore réaliser une analyse statistique des variations. On choisira plutôt d'associer à chaque variation constatée un mode caractéristique de cette variation. Il représentera la signature modale de l'impact de la variation d'un paramètre sur le résultat obtenu.

Si on possède la représentation d'une géométrie de référence à laquelle comparer la *géométrie à l'état libre* évaluée, il est dans ce cas possible de réaliser une analyse modale des écarts entre ces deux géométries. Elle est réalisée dans une base de modes caractéristiques des variations engendrées par la variation d'un paramètre de la méthode. On peut alors analyser la cause des écarts observés, en déterminant les paramètres qui en sont les causes, et même potentiellement évaluer les valeurs des paramètres qui permettent de limiter ces écarts afin de les corriger.

La méthode de retournement permettant d'obtenir une représentation de référence de la *géométrie à l'état libre*, ainsi que l'analyse de sensibilité réalisée, seront détaillées dans le *Chapitre 5*.

5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le contexte de la métrologie de composant souple, au travers d'un état de l'art qui a permis de faire ressortir cinq thèmes majeurs dans ce domaine. La synthèse de cet état de l'art a permis de positionner les travaux par rapport à ceux de la communauté. En résumé ces travaux se placent dans le cadre de l'utilisation de supports de mesure non dédiés afin de ne pas conformer les composants. Les composants étant peu contraints, il est nécessaire de réaliser l'acquisition de la géométrie avec une technologie de mesure sans contact. Les effets de l'environnement sur la géométrie du composant sont alors compensés par la simulation.

La méthode mise en œuvre afin d'évaluer des caractéristiques sur des composants souples, quelle que soit la configuration de mesure choisie, a été décrite. La théorie a été abordée, ainsi que les hypothèses sur la procédure qui permettent de garantir la validité du résultat. La méthode a ensuite été détaillée sur un exemple simple, afin notamment d'illustrer les différentes géométries abordées dans la théorie.

Cette méthode doit permettre dans un premier temps d'évaluer la géométrie à l'état libre d'un composant, en compensant par la simulation les effets de l'environnement sur celui-ci. Le fait d'être capable d'évaluer cette géométrie à l'état libre offre alors des perspectives intéressantes, car elle va permettre d'évaluer la géométrie contrainte de la pièce dans n'importe quelle configuration, sous réserve qu'on soit capable de simuler les effets de cette configuration sur le composant. Il est ainsi possible d'envisager d'anticiper la géométrie du composant dans une autre configuration de mesure ou de fabrication par exemple. Il sera également possible d'anticiper la géométrie qu'aura ce composant lorsqu'il sera assemblé ou en cours d'assemblage.

Chapitre **4**

Evaluation du jeu dans un assemblage

Sommaire

1	Introduction	101
2	Evaluation du jeu par la mesure	101
2.1	Etat de l'art	102
2.2	Synthèse	105
3	Choix d'une méthode d'évaluation de jeu par la mesure	105
3.1	Méthodes d'évaluation de jeu par la mesure non retenues dans le contexte	106
3.2	Méthodes d'évaluation de jeu par la mesure envisagées	106
3.2.1	Mesure à l'aide d'un jeu de cales d'épaisseur	106
3.2.2	Mesure par prise d'empreintes	107
3.2.3	Mesure indirecte par différence	109
3.3	Synthèse et choix d'une méthode d'évaluation de jeu par la mesure adaptée au contexte	110
4	Evaluation de jeu par la simulation	111
4.1	Contexte de la simulation d'assemblage en rigide	111
4.2	Procédure expérimentale	113
4.2.1	Mesure des composants	114
4.2.2	Intégration des données de mesure dans la simulation	115
4.2.3	Simulation de jeu en rigide	115
4.2.4	Simulation de jeu en flexible	118
4.3	Synthèse	119
5	Conclusion	120

1 Introduction

La mesure de jeu (au sens de *gap*, comme défini au *Chapitre 2*) est actuellement un problème dans l'industrie aéronautique, car c'est une opération manuelle, longue et fastidieuse. De plus le résultat de l'évaluation de ce jeu est sujet à de fortes incertitudes du fait des procédures mises en œuvre. Ainsi l'assemblage est fortement ralenti par cette opération d'évaluation de jeu par la mesure directe.

Dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS* plusieurs pistes sont étudiées afin d'améliorer le rendement de cette opération d'évaluation de jeu. D'une part des technologies de mesure de jeu plus performantes sont développées. Elle visent notamment à améliorer le rendement de l'opération d'évaluation du jeu par la mesure en l'automatisant. D'autre part l'un des objectifs majeurs au niveau des opérations d'assemblage est le développement d'un outil permettant de mieux modéliser le comportement d'un assemblage de composants considérés comme souples, et prenant en compte des données issues de la mesure des composants, concernant les géométries de leurs formes réelles et leurs comportements mécaniques réels. Il est ainsi envisagé d'évaluer la géométrie des jeux par simulation, à partir de la mesure des composants réels avant leur assemblage. Cette perspective devrait permettre un gain de temps conséquent.

Les chapitres précédents ont permis de définir quelles sont les données à intégrer aux modèles de simulation afin d'en améliorer les résultats, et comment réaliser l'acquisition et l'intégration de celles-ci. A partir de là, la simulation permet d'évaluer l'état géométrique des composants assemblés, l'étape suivante étant l'évaluation du jeu simulé à partir de ces résultats. Il est cependant nécessaire de valider ce jeu simulé afin de conclure quant aux performances de l'outil de simulation, comme illustré sur la *Figure 2.19* du *Chapitre 2*. Il est donc question dans ces travaux de validation expérimentale par la mesure de jeu.

L'objectif de ce chapitre est de présenter différentes méthodes permettant l'évaluation du jeu par la mesure dans un assemblage, et de comparer leurs performances vis à vis des contraintes liées au contexte. Ces méthodes doivent être compatibles avec la nature même de l'assemblage flexible. Elles doivent également permettre d'obtenir une représentation du jeu réel qui soit comparable au jeu simulé, l'objectif final étant de valider le jeu simulé.

La section 2 présente un *état de l'art des méthodes et moyens qui permettent de mesurer un jeu*. Différentes technologies sont présentées. Une synthèse permettra alors de mettre en avant les méthodes qui respectent les contraintes liées à l'assemblage flexible et qui peuvent être mises en œuvre dans le contexte de ces travaux.

La section 3 détaille ainsi les *méthodes de mesure de jeu qui peuvent ou non être mises en œuvre dans le contexte de ces travaux*. Celles-ci sont évaluées suivant différents critères, ce qui permet de faire ressortir les méthodes qui sont les plus pertinentes vis à vis du contexte de validation de simulation de jeu en flexible par la mesure.

La section 4 présente l'évaluation de jeu par la simulation, limitée dans un premier temps à un assemblage bi-composants rigides. Ceci doit permettre de valider certaines hypothèses concernant la modélisation et l'intégration des données de mesure à la simulation, avant le passage au flexible. Ce support permet également d'illustrer toute la procédure d'évaluation de jeu par la simulation et de réalisation des cales sur mesure.

2 Evaluation du jeu par la mesure

Cette première section fait l'objet d'un état de l'art concernant des méthodes et moyens qui permettent d'évaluer un jeu par la mesure dans un assemblage de composants. Certains sont dédiés à la mesure de jeu, d'autres non. L'objectif est ici de passer en revue toutes les technologies qui peuvent permettre de répondre à notre besoin d'évaluation de jeu par la mesure.

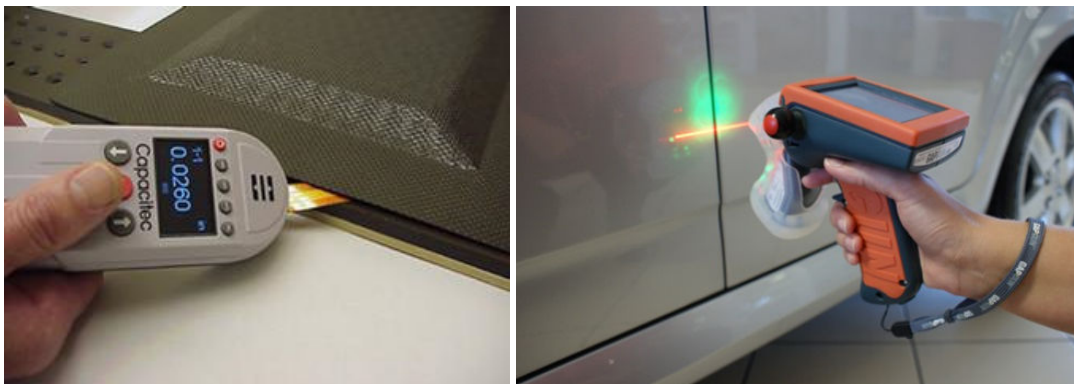


Figure 4.1 – Systèmes de mesure de jeux utilisés dans l’industrie aéronautique, *Gapman* [Capacitec, 2015] et *Gapgun* [Third-Dimension, 2015].

2.1 Etat de l’art

Dans l’industrie aéronautique, les techniques utilisées pour mesurer les jeux restent relativement basiques. De ce fait, vu la dimension des composants à assembler et le nombre d’interfaces entre eux, les opérations de mesure de jeu peuvent être fastidieuses et sont très coûteuses en temps. Généralement des systèmes de mesure manuels sont utilisés, tels que :

- ✦ Des *cales d’épaisseur* : Ce moyen de mesure permet de déterminer la distance entre deux composants en insérant manuellement à l’intérieur du jeu des cales parallélépipédiques de différentes épaisseurs. La dimension du jeu mesuré est comprise entre la dimension de la cale la plus grande pouvant être insérée et la dimension de la cale la plus petite ne pouvant pas être insérée. La résolution est fonction de la gamme de dimensions des cales, sachant que le temps de l’opération augmente lorsque le nombre de cales augmente. Il n’y a pas de contrainte particulière sur le matériau mesuré. L’image du jeu obtenue est *1D*. Il est nécessaire de répéter l’opération de mesure pour obtenir une cartographie *3D* de la forme du jeu. Il est par contre difficile de déterminer précisément la localisation de chaque mesure effectuée.
- ✦ Le *Gapman* [Capacitec, 2015] : Ce système de mesure permet de déterminer la distance entre deux composants en mesurant la réactance (partie imaginaire de l’impédance) d’un courant qui les traverse. L’introduction manuelle d’une tige entre les deux composants limite la géométrie des jeux mesurables, et notamment leur valeur minimale mesurable (environ 0.15mm). De plus il est nécessaire qu’au moins l’un des deux composants soit métallique pour permettre le passage du courant. Il permet également d’obtenir une représentation *1D* du jeu (puis *3D* par répétition de l’opération de mesure), tout aussi compliquée à localiser.
- ✦ Le *Gapgun* [Third-Dimension, 2015] : Ce système de mesure *LASER* sans contact permet de déterminer les affleurements et les jeux en surface de l’assemblage. Il n’autorise cependant pas un accès physique à la zone entre les composants. Il permet cependant d’obtenir une image *3D* du jeu et des affleurements. Dans la même lignée [Kosmopoulos et Varvarigou, 2001] présente un système équipé de deux caméras et de deux lampes infrarouges qui permet d’obtenir une mesure comparable à celle du Gapgun. Pour obtenir une représentation complète du jeu, il est alors nécessaire d’extrapoler l’information mesurée aux bords.

Le faible rendement de ces systèmes de mesure, et leur difficulté de mise en œuvre, mettent en avant la nécessité d’améliorer cette opération d’évaluation de jeu par la mesure. Ainsi de nombreux travaux ont été réalisés dans le but de fournir des outils de mesure performants adaptés aux problèmes rencontrés par les industriels.

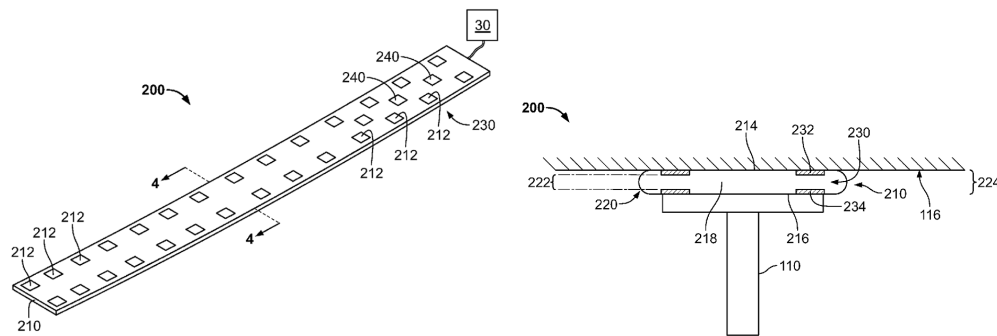


Figure 4.2 – Système de mesure de jeu *gonflable*, avec capteurs inductifs [Buttrick, 2014].

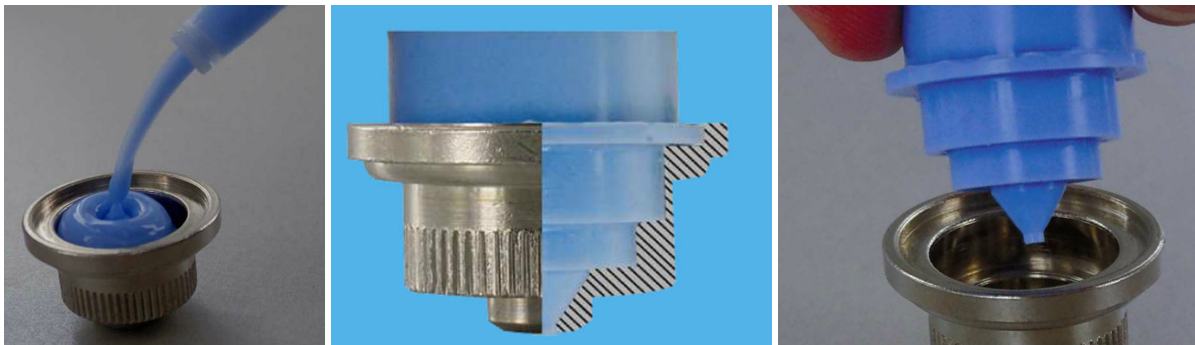


Figure 4.3 – Prise d’empreinte à l’aide d’un composé polymère (*Plastiform*).

D’autres technologies de mesure avec contact ont ainsi été développées. [Buttrick, 2014] présente un système de mesure de jeu innovant qui permet, en insérant une matrice de capteurs entre deux composants, et en venant *gonfler* cette matrice, d’obtenir une cartographie du jeu entre les deux composants. Un schéma de principe est visible en *Figure 4.2*. Il est possible d’utiliser des capteurs inductifs ou mécaniques. Cette technologie est bien adaptée à la mesure de jeu en vue du calage puisque le système de mesure vient épouser la forme du jeu. Cependant le jeu doit être relativement important pour pouvoir accueillir la matrice en *configuration dégonflée*. De plus la résolution de la mesure est imposée par la répartition des capteurs sur la matrice. Enfin, l’assemblage doit être suffisamment rigide pour que l’insertion du capteur ne vienne pas modifier son état géométrique, et donc influencer sur la géométrie du jeu.

[Kim *et al.*, 2014] proposent d’utiliser un matériau expansif afin de boucher le jeu entre les électrodes d’une batterie. Un procédé similaire est utilisé dans l’industrie aéronautique afin d’injecter une résine entre les composants et de réaliser un *calage liquide*. Cette méthode est cependant jugée trop coûteuse dans l’aéronautique car, en plus d’être très longue du fait du temps de séchage, le matériau utilisé doit présenter des caractéristiques mécaniques très particulières. En effet, il fera partie intégrante de l’assemblage et devra supporter les efforts au sein de celui-ci. Cependant ce principe de moulage semble relativement adapté à la problématique de mesure de jeu.

La prise d’empreinte dans un assemblage flexible impose des contraintes sur le choix du matériau et de la méthode. En effet, afin de réaliser une mesure dimensionnelle il est nécessaire de choisir un matériau qui garantit un retrait nul lors de la solidification. Il est également nécessaire que l’empreinte reste stable dans le temps et à température ambiante, puisqu’il sera nécessaire dans un second temps de mesurer cette empreinte. Ensuite il faut également que l’empreinte soit suffisamment rigide pendant et après démoulage, ce qui n’est pas garanti dans le cas de la mesure de jeu de quelques dixièmes de millimètres d’épaisseur. Enfin, il faut que l’application du matériau entre les composants soit relativement simple. La société *Plastiform* propose des matériaux polymères de ce genre pour le contrôle dimensionnel, visibles sur la *Figure 4.3*.

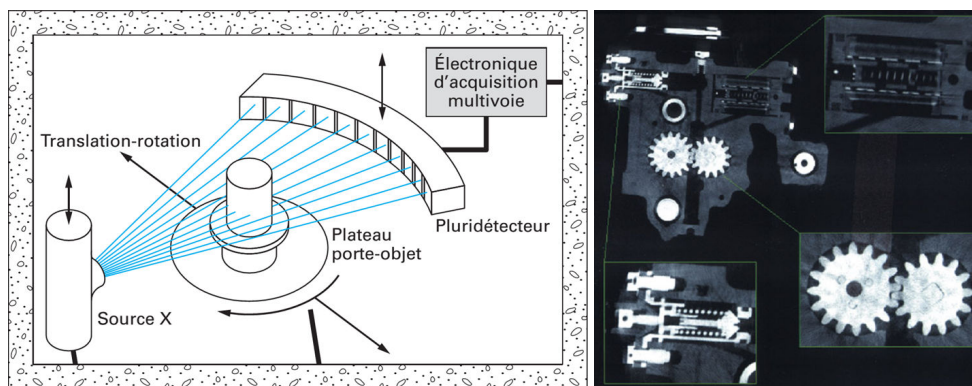


Figure 4.4 – Principe de la tomographie industrielle et application à la vérification de la position de composants à l'intérieur d'un assemblage [Thiery, 2013].

Un matériau relativement fluide à l'application, qui polymérise lentement, et qui est rigide après polymérisation, semble bien adapté à toutes les contraintes imposées par la mesure de jeu en flexible. Il est cependant nécessaire de vérifier que l'introduction du matériau fluide au sein de l'assemblage flexible ne modifie pas l'état géométrique de celui-ci.

Le principal désavantage des moyens de mesure de jeu avec contact est qu'ils peuvent potentiellement modifier la géométrie du jeu lors de la mesure si les composants sont trop souples. La difficulté à atteindre la zone à mesurer montre également la limite de ces systèmes. Ainsi de nombreuses technologies de mesure sans contact sont en plein essor depuis quelques années. Après avoir été développées dans le domaine du *Contrôle Non-Destructif* afin de détecter d'éventuelles fissures au sein des matériaux, elles sont aujourd'hui en passe d'être utilisées dans le cadre de la métrologie dimensionnelle.

[Cung *et al.*, 2011] ont travaillé sur la mesure de jeu inter-composants à l'aide de systèmes de mesure par *courants de Foucault*. Cette technologie repose sur la mesure des champs magnétiques émis lorsqu'un courant traverse les composants. Ces travaux originaux cherchent à développer un outil qui permettrait de mesurer un jeu entre deux composants métalliques. Les limitations actuelles concernent l'épaisseur maximale du jeu mesurable (environ 0.5mm) et la nécessité de connaître l'épaisseur réelle de la pièce traversée afin de garantir le résultat de la mesure de jeu.

[Segal et Trichter, 1989] et [Karp et Adam, 1994] avaient déjà pour ambition la mesure de jeu inter-composants à l'aide d'une technologie de mesure sans contact par *rayons X*. Les résultats de leurs travaux étaient cependant peu concluants en terme de qualité du résultat de la mesure de jeu. Le premier conclut notamment sur des erreurs sur la valeur du jeu évalué de l'ordre d'un facteur 2. Les deux sont d'accord sur l'importance de connaître la géométrie qui est mesurée afin d'utiliser le système de mesure dans les meilleures conditions.

Depuis quelques années, la *tomographie par absorption de rayons X*, présentée par [Thiery, 2013], prend peu à peu place dans le monde industriel. Elle permet l'acquisition d'images en coupe d'un composant. La combinaison de ces images en coupe permet de reconstruire la géométrie en trois dimensions du composant mesuré. Le principe est détaillé sur la *Figure 4.4*. Très présente dans le domaine médical, elle offre des résolutions de 0.5 mm environ du fait des faibles rayonnements émis. Dans le domaine industriel la résolution peut alors atteindre 0.05 mm. Le principal inconvénient de ce type de technologie est actuellement la portabilité. Elle nécessite en effet des mesures réalisées dans une enceinte protégée, du fait de la nocivité des rayonnements émis pour le corps humain. Ainsi les dimensions des pièces mesurables restent à l'heure actuelle relativement limitées.

[Carmignato *et al.*, 2004] et [Kruth *et al.*, 2011] abordent la *tomographie par absorption de rayons X* en vue de la métrologie dimensionnelle. Les notions d'incertitudes relatives à la mise en œuvre de cette

technologie et de traçabilité sont évoquées. Ils mettent enfin en avant l'avantage certain de cette technologie en terme d'accessibilité, qui peut en faire une alternative sérieuse dans le cadre de la mesure multi-capteur.

Enfin, la technologie de mesure par *ultrasons*, qui en plus d'être utilisée dans le domaine du *Contrôle Non-Destructif*, semble également adaptée à la mesure de jeu. Dans le cadre du projet européen *LOCO-MACHS*, les entreprises *Dassault Aviation* et *Sonaxis* travaillent à la mise au point d'un système de mesure de jeu par ultrasons. Très utilisée dans d'autres domaines tels que le médical ou la géologie, elle possède des avantages certains de mise en œuvre. On peut toutefois noter que l'application à des matériaux hétérogènes tels que les composites peut être problématique. L'utilisation en milieu bruyant, comme un atelier d'assemblage, est également à prendre en compte, car ce bruit peut être potentiellement source de perturbation.

2.2 Synthèse

Malgré les avancées technologiques importantes ces dernières années, notamment au niveau des moyens et des procédés de mesure sans contact, la mise en œuvre de la mesure de jeu dans l'industrie reste une problématique technique ouverte. En effet, les méthodes et technologies actuellement utilisées sur les chaînes d'assemblage pour mesurer des jeux semblent rudimentaires vis-à-vis du domaine d'application.

Des moyens de mesure avec contact ont été développés, mais ne semblent pas pouvoir remplacer les outils actuels. Les causes principales semblent être le coût et la difficulté de mise en œuvre (système de mesure dédié à une géométrie de jeu ou procédure de mesure complexe).

En ce qui concerne les technologies de mesure sans contact, la principale difficulté rencontrée semble être la mise en œuvre dans un cadre industriel sur des pièces de grande dimension. En effet, ces technologies semblent être encore à l'heure actuelle des technologies non-portatives. Cependant il semble évident que dans quelques années, lorsqu'elles seront arrivées à maturité, ces technologies permettront d'améliorer considérablement les opérations de mesure de jeu sur les postes d'assemblage.

Puisque les travaux présentés dans ce manuscrit se placent au niveau de la validation expérimentale d'un outil de simulation, le critère de difficulté de mise en œuvre dans un cadre industriel n'est pas une contrainte majeure. Ce qui prime dans le choix d'une méthode de mesure de jeu est donc la qualité de la représentation du jeu obtenue, ainsi que sa résolution. Une condition essentielle est de s'assurer que l'évaluation du jeu par la mesure ne viendra pas perturber l'assemblage en modifiant son état géométrique.

3 Choix d'une méthode d'évaluation de jeu par la mesure

Dans cette partie sont détaillées différentes méthodes qui permettent d'évaluer par la mesure un jeu entre deux composants assemblés. Le choix de ces méthodes s'est fait à partir de l'état de l'art présenté *Section 2.1*. Différents critères, qui seront détaillés lors de la description de ces méthodes, permettent de les classer.

Deux contraintes supplémentaires sont venues orienter le choix de ces méthodes dans le contexte de ces travaux de thèse :

- ✈ L'accès aux différentes technologies de mesure.
- ✈ La possibilité de les mettre en œuvre pour la validation expérimentale qui sera présentée dans le *Chapitre 5*.

La section suivante aborde ainsi les méthodes qui n'ont pas été retenues pour la mesure de jeu dans le contexte de ces travaux, afin d'en expliquer les causes.

3.1 Méthodes d'évaluation de jeu par la mesure non retenues dans le contexte

Le *Gapman* n'a pas été retenu, car sa mise en œuvre s'apparente très fortement à la mesure à l'aide de cales d'épaisseur. Il semble en effet que ce système ne permette pas d'obtenir les résultats escomptés pour la validation expérimentale. En ce qui concerne le *Gapgun*, il est plutôt destiné à évaluer des affleurements. Son utilisation sur le support expérimental du *Chapitre 5* n'est pas vraiment adaptée.

La technologie de mesure par *ultrasons* n'a pas été retenue également, car le système développé dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS* n'est à l'heure actuelle pas opérationnel.

Il en est de même pour la mesure de jeu par *courants de Foucault*, qui est actuellement développée au laboratoire *SATIE* de l'*ENS de Cachan*. La technologie en est encore au stade du développement, et il n'existe actuellement pas un système de mesure permettant de garantir le résultat de mesure de jeu.

Enfin, la mise en œuvre de la mesure de jeu à l'aide de la *tomographie par absorption de rayons X* sur le support expérimental du *Chapitre 5* n'a pas pu être réalisée, puisque ses dimensions trop importantes ne permettaient pas de le mesurer sur la machine présente au laboratoire *LMT* de l'*ENS de Cachan*.

3.2 Méthodes d'évaluation de jeu par la mesure envisagées

Les méthodes envisagées, dans le contexte de ces travaux de thèse, pour évaluer un jeu par la mesure, sont les suivantes :

- Mesure à l'aide d'un jeu de cales d'épaisseur.
- Mesure par prise d'empreinte directe, démoulage, puis mesure de l'empreinte.
- Mesure par prise d'empreinte directe puis mesure de l'empreinte sur l'un des composants.
- Mesure indirecte par différence.

Ces méthodes sont décrites dans les sections suivantes. Afin de les comparer, elles ont été évaluées suivant différents critères, qui sont :

- L'*Evaluation* réalisée : C'est à dire si la méthode permet de mesurer directement ou indirectement le jeu. Une mesure la plus directe possible est préférable.
- La *Résolution* de l'image du jeu obtenue : C'est à dire la finesse de représentation du jeu mesuré. Le coût lié à l'évaluation pour obtenir une représentation de densité similaire permet de classer les méthodes, l'objectif étant de minimiser ce coût.
- La *Justesse* d'évaluation du jeu par la mesure : C'est à dire la capacité de la méthode à fournir une image du jeu fidèle à la géométrie du jeu réel dans l'état géométrique correspondant. La justesse sera moins bonne si la méthode de mesure influe sur cet état géométrique.
- La *Reproductibilité* d'évaluation du jeu par la mesure : C'est à dire la capacité de la méthode à fournir une représentation du jeu qui présentera des variations faibles.
- La facilité de *Mise en œuvre* de la méthode.

Ces critères doivent permettre de hiérarchiser les différentes méthodes, en fonction des objectifs recherchés. Ils restent seulement qualitatifs car l'objectif ici est de permettre le choix d'une méthode adaptée à la validation expérimentale sur le support conçu pour l'occasion. Une étude quantitative aurait nécessité une mise en œuvre de toutes ces méthodes sur un jeu étalon, afin de pouvoir comparer les résultats obtenus.

3.2.1 Mesure à l'aide d'un jeu de cales d'épaisseur

Puisque cette méthode est actuellement utilisée dans l'industrie aéronautique pour mesurer des jeux entre des composants, il semble naturel de la l'étudier afin d'avoir une référence industrielle. En effet, cela permet de mettre en avant les difficultés liées à la mise en œuvre de cette méthode de mesure. Cela permet également

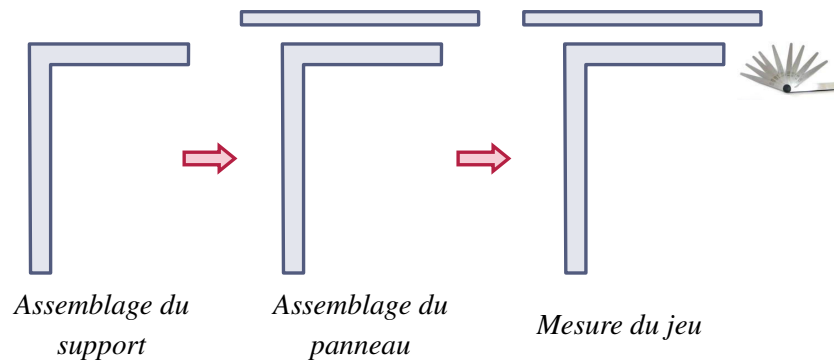


Figure 4.5 – Illustration de la méthode de mesure à l'aide d'un jeu de cales d'épaisseur.

Méthode	Evaluation	Résolution	Justesse	Reproductibilité	Mise en œuvre
Cales d'épaisseur	Directe	-	--	--	--

Tableau 4.1 – Evaluation qualitative de la mesure de jeu à l'aide de cales d'épaisseur.

de valider (ou non) les performances des autres méthodes qui seront étudiées, que ce soit au niveau de la justesse du résultat, de la résolution de l'image du jeu obtenue ou de la facilité de mise en œuvre.

Cette méthode consiste à utiliser des cales d'épaisseur afin de déterminer l'ouverture du jeu. On insère différentes cales afin de déterminer la valeur de ce jeu. On répète cette opération en chaque point de mesure prédéfini afin d'obtenir une cartographie du jeu entre les composants. La procédure de mesure est illustrée sur la Figure 4.5.

Cette opération est fastidieuse, car chaque mesure de jeu peut prendre beaucoup de temps. En effet, lorsque le jeu réel est très différent du jeu théorique, il faut un certain temps avant de trouver les bonnes cales. De plus on remarque qu'il n'est pas évident de réaliser la mesure au *bon endroit* (du fait de la géométrie du jeu et du moyen de mesure), ce qui peut générer une forte incertitude sur la cartographie du jeu mesuré.

Le Tableau 4.1 résume les performances de cette méthode suivant les différents critères évoqués.

3.2.2 Mesure par prise d'empreintes

Deux méthodes, basées sur la prise d'empreinte, sont étudiées. Le principe est identique, mais la seconde méthode permet de s'affranchir des problèmes liés à la souplesse potentielle de l'empreinte.

(a) Mesure par prise d'empreinte directe, démoulage, puis mesure de l'empreinte

L'évaluation du jeu par moulage semble être une alternative intéressante. Elle permet en effet de réaliser un objet physique dont les caractéristiques sont censées correspondre au jeu entre les composants. Il suffit ensuite de mesurer cet objet, avec un système de mesure classique, pour en déduire la cartographie du jeu.

Il est cependant nécessaire d'utiliser un matériau garantissant une stabilité dimensionnelle dans le temps (et notamment lors du *séchage*). Un matériau polymère semble ainsi bien adapté. Il faut également s'assurer qu'il permette de refléter la géométrie réelle des interfaces si on souhaite obtenir une image très fine du jeu mesuré. Sa non influence sur l'état géométrique de l'assemblage est également une condition essentielle.

Différentes stratégies sont envisageables en fonction notamment de la géométrie du jeu ou du temps de polymérisation du matériau. Il est ainsi possible de réaliser l'assemblage puis d'injecter un polymère relativement fluide à l'état initial, ou bien alors de déposer avant assemblage au niveau de la zone de jeu un polymère plutôt pâteux à l'état initial. Dans le cas d'un assemblage de composants souples il reste à s'assurer que la présence du matériau polymère ne viendra pas modifier le comportement de l'assemblage,

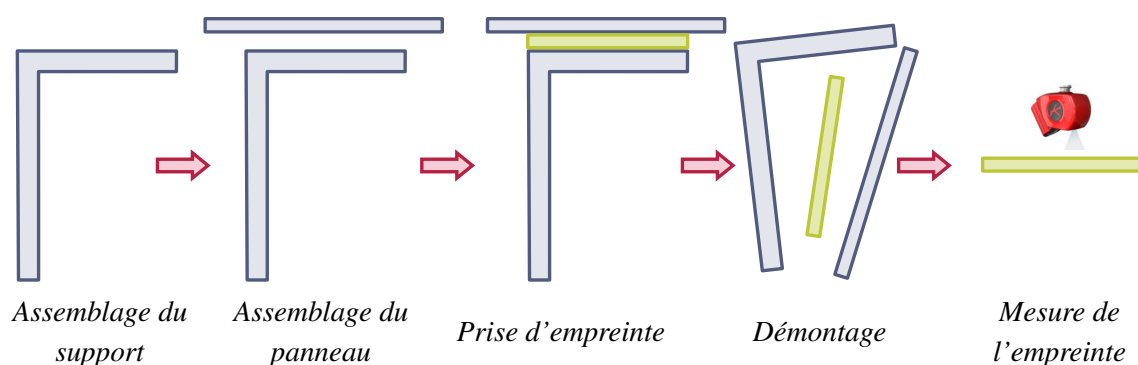


Figure 4.6 – Illustration de la méthode de mesure par prise d’empreinte directe, démoulage, puis mesure de l’empreinte.

Méthode	Evaluation	Résolution	Justesse	Reproductibilité	Mise en œuvre
Prise d’empreinte	Semi-directe	++	-	-	-

Tableau 4.2 – Evaluation qualitative de la mesure de jeu par prise d’empreinte directe, démoulage, puis mesure de l’empreinte.

et donc sa géométrie. Il reste ensuite à démonter l’assemblage et à récupérer l’empreinte du jeu. La méthode est illustrée sur la *Figure 4.6*.

La mesure de cette empreinte va permettre d’obtenir une image du jeu. Il est ainsi nécessaire de mesurer les deux faces de l’empreinte afin d’obtenir une cartographie du jeu. Il faut également prendre des précautions lors de la mesure afin de pouvoir recalcr correctement les mesures des deux faces, qui ne peuvent pas être acquises simultanément. Dans le cas où il n’y a pas d’éléments qui peuvent servir de référence sur l’empreinte (bords, trous, ...), l’incertitude de recalage de la cartographie du jeu évaluée par la mesure dans le référentiel de l’assemblage peut être importante. La résolution de la représentation est plus importante qu’avec la méthode précédente. Elle est conditionnée d’une part par le matériau qui permet de réaliser l’empreinte. L’entreprise *Plastiform* garantit par exemple une *précision* de moulage de 0.001mm (ce qui correspond à la résolution de l’empreinte). En effet, le matériau utilisé permet de relever les aspérités des surfaces avec lesquelles il est en contact. C’est ainsi le système de mesure qui va conditionner cette résolution. Dans le cas de l’utilisation du capteur *LASER* plan, celle-ci est largement suffisante (plusieurs points par mm^2).

Il est important de noter qu’en fonction de la géométrie du jeu (très faible épaisseur), l’empreinte peut être relativement souple après démoulage. Cela est alors problématique, car il est dans ce cas nécessaire de prendre les précautions détaillées dans le *Chapitre 3* concernant la mesure de composant souple.

La dépose d’un film protecteur peut être nécessaire pour assurer le démoulage de l’empreinte. Il faut alors tenir compte de l’épaisseur de ce film afin d’évaluer la valeur du jeu mesuré.

Le *Tableau 4.2* résume les performances de cette méthode suivant les différents critères évoqués.

(b) Mesure par prise d’empreinte directe puis mesure de l’empreinte sur l’un des composants

Cette méthode est une alternative à la méthode précédente, afin de garantir la rigidité de l’empreinte après démoulage. Ainsi une étape préliminaire de mesure du composant qui supportera l’empreinte est nécessaire. Il est judicieux de mesurer ce composant avec le même système de mesure que celui qui servira pour la mesure de la face accessible de l’empreinte. De plus il faut s’assurer de mesurer des éléments de référence (sur le composant par exemple) afin de pouvoir recalcr les deux mesures l’une par rapport à l’autre. Dans le cas où le composant support de l’empreinte reste fixe par rapport au référentiel de mesure (bâti par exemple), on limite les incertitudes liées au recalage des mesures.

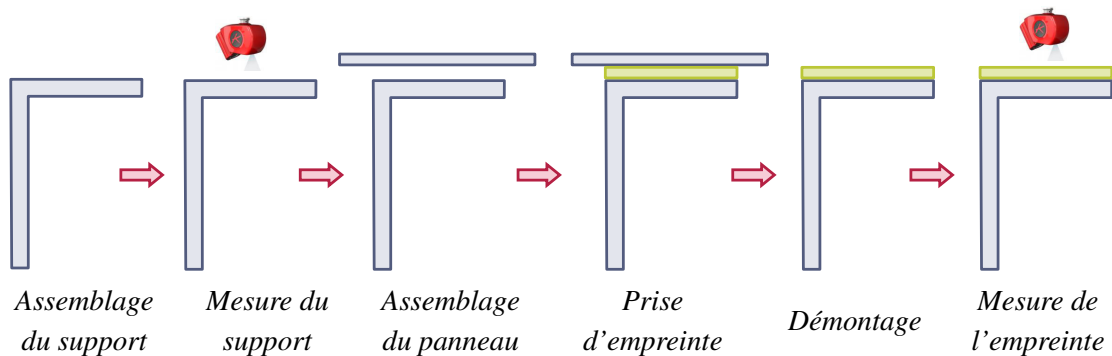


Figure 4.7 – Illustration de la méthode de mesure par prise d'empreinte directe puis mesure de l'empreinte sur l'un des composants.

Méthode	Evaluation	Résolution	Justesse	Reproductibilité	Mise en œuvre
Prise d'empreinte fixe	Semi-directe	++	+	-	+

Tableau 4.3 – Evaluation qualitative de la mesure de jeu par prise d'empreinte directe puis mesure de l'empreinte sur l'un des composants.

La procédure de prise d'empreinte reste similaire. Cependant lors du démontage il faut veiller à ne pas retirer l'empreinte de la pièce support. On réalise alors une seconde mesure de l'empreinte sur le composant. L'image du jeu est obtenue par différence avec la mesure réalisée sur la pièce avant assemblage. La méthode est illustrée sur la *Figure 4.7*.

Par rapport à la méthode précédente, on garantit ici une certaine rigidité de l'empreinte, donnée par le composant qui la supporte. De plus le recalage des mesures des deux faces de l'empreinte sera meilleur dans le cas où la pièce support reste fixe dans le référentiel de mesure. La résolution du jeu évalué est identique à système de mesure de l'empreinte identique. La dépose d'un film protecteur peut également être nécessaire pour assurer le démoulage de l'empreinte

Le *Tableau 4.3* résume les performances de cette méthode suivant les différents critères évoqués.

3.2.3 Mesure indirecte par différence

Les trois méthodes détaillées précédemment nécessitent une mesure par contact, qui peut être préjudiciable pour la mesure de jeu dans un assemblage flexible. N'ayant pas la possibilité de mettre en œuvre les technologies sans contact détaillée dans la *Section 3.1*, une méthode de mesure pouvant être réalisée sans contact avec l'assemblage a été imaginée.

Il s'agit tout d'abord, avant assemblage, de réaliser une mesure de la pièce support (comme pour la méthode précédente). Dans le cas où le composant mesuré n'est pas fixe dans le référentiel de mesure, il est également nécessaire de mesurer des éléments de référence qui resteront accessibles après assemblage.

L'assemblage est ensuite réalisé. L'idée est alors de mesurer la pièce assemblée au niveau de la zone qui correspond au jeu. Sous réserve que l'épaisseur du composant soit connue, il est possible de déduire une image du jeu évalué par différence des deux mesures réalisées et en tenant compte de l'épaisseur du composant ajouté lors de l'assemblage. L'évaluation du jeu est encore plus simple si l'épaisseur du composant est considérée comme constante. La méthode est illustrée sur la *Figure 4.8*.

Cette méthode permet de garantir la non modification de la géométrie de l'assemblage au cours de la mesure (si on considère le composant de référence suffisamment rigide pour ne pas être déformé au cours de l'assemblage). De plus le recalage des mesures des deux faces de l'empreinte sera aussi bon que pour la méthode précédente. La résolution du jeu évalué est également identique à système de mesure identique.

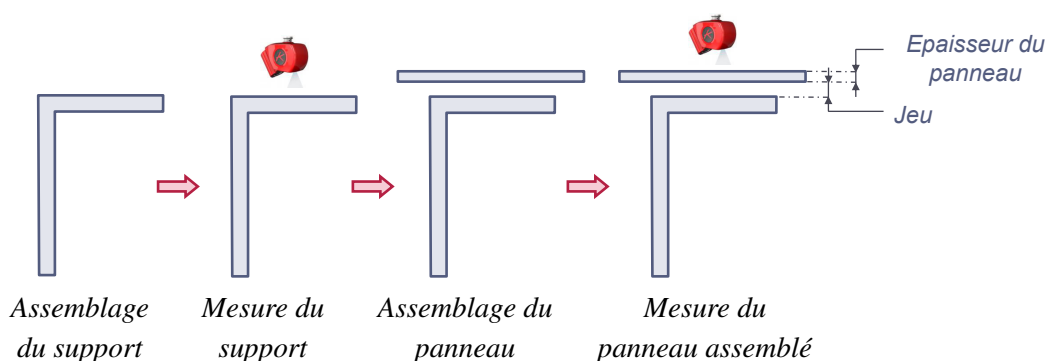


Figure 4.8 – Illustration de la méthode de mesure indirecte par différence.

Méthode	Evaluation	Résolution	Justesse	Reproductibilité	Mise en œuvre
Mesure par différence	Indirecte	++	-	++	++

Tableau 4.4 – Evaluation qualitative de la mesure de jeu par mesure indirecte par différence.

Le principal inconvénient de cette méthode vient du fait qu'elle est indirecte, et qu'elle repose sur une hypothèse importante concernant la connaissance de l'épaisseur du second composant assemblé. Il sera donc nécessaire de s'assurer de sa validité avant la mise en œuvre de la méthode présentée.

Le *Tableau 4.4* résume les performances de cette méthode suivant les différents critères évoqués.

3.3 Synthèse et choix d'une méthode d'évaluation de jeu par la mesure adaptée au contexte

Le *Tableau 4.5* regroupe les résultats de l'analyse qualitative réalisée au cours des sections précédentes.

Ces différents critères permettent de hiérarchiser les différentes méthodes en fonction des critères jugés comme principaux. Afin de caler au mieux les composants, il est nécessaire d'avoir une bonne résolution au niveau de l'image du jeu. On observe immédiatement que ce n'est pas le cas avec la mesure par cales d'épaisseur. C'est pourtant la méthode utilisée dans l'industrie, ce qui justifie d'autant plus la nécessité de trouver d'autres alternatives à cette méthode de mesure. Il faut tout de même souligner que c'est la seule méthode qui permet une évaluation directe du jeu.

La méthode de mesure par différence semble relativement performante. En effet, en termes de reproductibilité et de facilité de mise en œuvre c'est celle qui offre le plus de garanties. Cependant elle est indirecte, et repose fortement sur l'hypothèse d'épaisseur connue du composant à assembler. Cette hypothèse est cependant plausible pour un composant métallique corroyé de type plaque. L'épaisseur est considérée comme constante, puisque une variation de l'ordre de 0.01mm resterait de toute façon largement inférieure à l'incertitude de mesure dans le cas de l'utilisation d'un système de numérisation *LASER*.

La méthode de mesure par prise d'empreinte directe, démoulage, puis mesure de l'empreinte seule semble moins appropriée à la mesure de jeux de faible épaisseur car il est difficile de garantir la rigidité de l'empreinte lorsque celle-ci est démoulée. En effet, les matériaux polymères qui garantissent cette rigidité après démoulage ont généralement soit un aspect très pâteux à l'application (ce qui aurait un impact non négligeable sur l'état géométrique de l'assemblage lors de la prise d'empreinte), soit une durée de polymérisation très courte (ce qui rend leur mise en œuvre très difficile dans ce cas). Il existe bien des polymères ayant des caractéristiques antagonistes, mais ce sont des matériaux très coûteux.

La méthode de mesure par prise d'empreinte directe, démoulage, puis mesure de l'empreinte fixée sur le composant permet de garantir la relative rigidité de l'empreinte. De plus cette méthode ne repose pas

Méthode	Evaluation	Résolution	Justesse	Reproductibilité	Mise en œuvre
Cales d'épaisseur	Directe	-	--	--	--
Prise d'empreinte	Semi-directe	++	-	-	-
Prise d'empreinte fixe	Semi-directe	++	+	-	+
Mesure par différence	Indirecte	++	-	++	++

Tableau 4.5 – Tableau récapitulatif des performances de chacune des méthodes.

sur une hypothèse concernant la géométrie des composants. Elle peut être plus difficile à mettre en œuvre en fonction de la stratégie d'application du polymère entre les composants. Elle a par contre l'avantage de permettre une mesure semi-directe du jeu.

La reproductibilité des méthodes par mesure d'empreinte est toutefois directement liée l'application du matériau polymère au niveau de la zone du jeu à mesurer. En effet, si cette méthode influe sur l'état géométrique de l'assemblage, la quantité de pâte qui sera déposée pourra avoir une influence directe sur la géométrie de l'empreinte (efforts d'assemblage pas suffisants pour chasser le surplus de pâte). Le problème sera le même dans le cas de l'injection de la pâte au niveau de la zone du jeu (pression d'injection trop importante qui génère des contraintes au sein de l'assemblage).

En résumé on optera en priorité pour la méthode de mesure par différence, qui offre des garanties concernant la non influence de la mesure sur l'état géométrique de l'assemblage. Elle sera d'autant plus appropriée lorsque la géométrie des composants sera extrêmement sensible à l'environnement (c'est à dire lorsqu'il n'y aura pas ou peu d'efforts permettant le maintien des composants au niveau de l'assemblage). La mesure par prise d'empreinte semble plus fidèle et permet une mesure semi-directe qui ne repose sur aucune hypothèse concernant la géométrie des composants. Elle sera également mise en œuvre, mais afin d'observer si le moulage de l'empreinte a un impact significatif sur l'état géométrique de l'assemblage.

La mise en œuvre des méthodes retenues pour la validation expérimentale de la simulation de jeu dans un assemblage fera l'objet de la *Section 6.2 du Chapitre 5*.

4 Evaluation de jeu par la simulation

L'objectif principal de cette section est de présenter la simulation de jeu sur un assemblage bi-composant rigide. On se place ainsi dans un cas où l'état géométrique des composants est invariant quel que soit l'environnement. Ainsi l'état géométrique de l'assemblage de ces composants ne dépend que de leurs caractéristiques géométriques.

La modélisation de l'assemblage est maîtrisée, afin de limiter les incertitudes sur le résultat de la simulation d'assemblage, et donc de jeu. Celles-ci sont limitées aux incertitudes dues à la mesure des interfaces et des éléments de référence, au recalage de ces données dans un repère construit à partir des mesures réalisées sur les éléments de référence, et au traitement des résultats de simulation en vue d'obtenir une représentation du jeu simulé. Cela doit permettre de valider le choix des éléments géométriques mesurés et l'intégration des données de mesure au sein du processus de simulation d'assemblage.

4.1 Contexte de la simulation d'assemblage en rigide

Un assemblage bi-composant rigide a été conçu afin de mettre en œuvre le processus de simulation de jeu à partir d'une acquisition de la géométrie de la forme réelle de certains éléments géométriques des composants assemblés. Ce support est visible sur la *Figure 4.9*. Il est composée d'un *socle* (composant bleu) et d'un *couvercle* (composant jaune).



Figure 4.9 – Assemblage bi-composant rigide étudié.

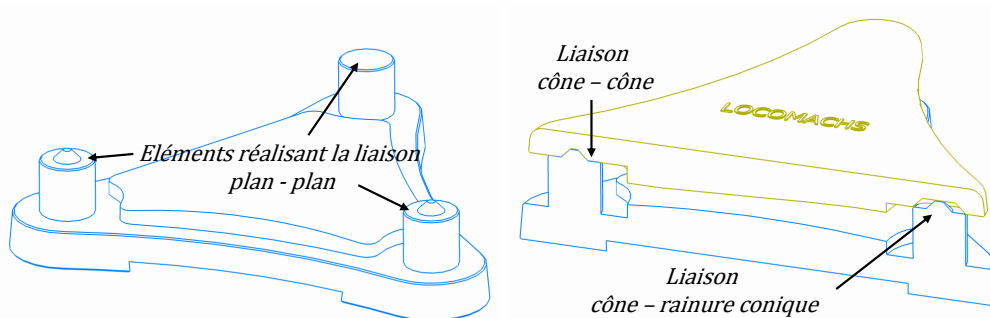


Figure 4.10 – Illustrations des liaisons et des éléments géométriques de référence.

Cet assemblage a été réalisé en *impression 3D* par l'entreprise *Airbus Group*. Il a été conçu dans le but d'illustrer le processus complet détaillé dans le *Chapitre 2*, de la mesure des composants jusqu'au calage et assemblage définitif. Ce support a fait l'objet d'une démonstration du processus de calage sur mesure dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*.

Cet assemblage possède les caractéristiques suivantes :

- Il est composé de deux composants rigides.
- Chaque composant présente deux groupes distincts de surfaces réalisant les interfaces entre les deux composants. Un premier groupe, contenant les *éléments de référence*, permettant la mise en position répétable des deux composants l'un par rapport à l'autre (éléments géométriques situés aux trois coins du support). Un second groupe, contenant les surfaces à l'*interface jeu*, qui correspondent aux surfaces qui délimitent le jeu (éléments géométriques occupant la partie centrale du support).
- Les *éléments de référence*, visibles sur la *Figure 4.10*, permettent de réaliser une liaison complète entre les composants, définie par les liaisons élémentaires *plan - plan*, *cône - cône* et *cône - rainure conique*. En imposant des dimensions légèrement plus grandes sur les cônes mâles, il est possible d'imposer une liaison sans jeu. Ceci permet de garantir une mise en position répétable dans la pratique. La simulation de jeu consistera à faire correspondre les repères, évalués pour chaque composant, à partir de ces *éléments de référence*.
- Le support est conçu de telle sorte que le jeu nominal à l'*interface jeu* soit non nul, ce qui garantit le contact au niveau des *éléments de référence*. Il est suffisamment important pour garantir la rigidité de l'empreinte du jeu qui pourrait être réalisée.

L'idée de base pour réaliser la liaison complète entre les deux composants était la liaison *plan - trait - point* définie par *Kelvin*. Cette liaison garantit un positionnement isostatique et sans jeu, et les éléments géométriques qui la composent peuvent être réalisés facilement par *impression 3D*. Cependant la détermination par la mesure des *éléments de référence* des trois liaisons élémentaires semble extrêmement complexe. Par

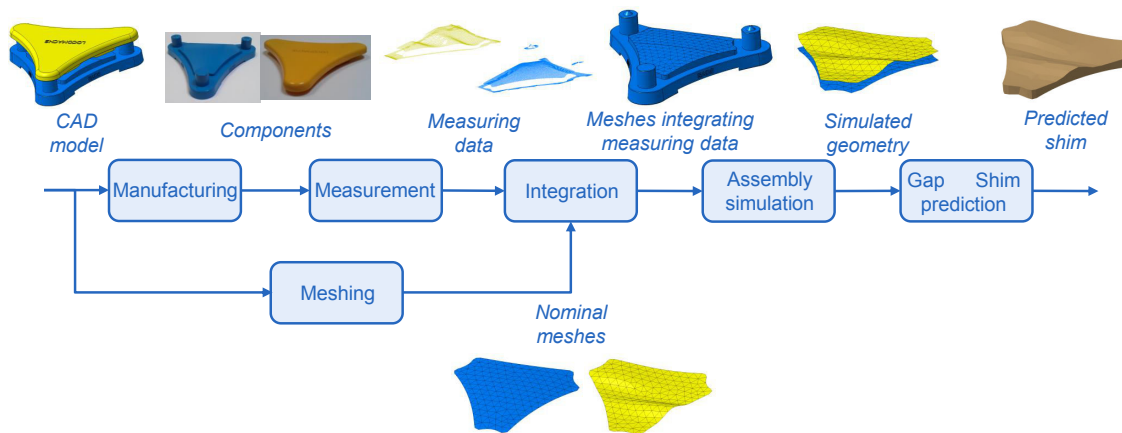


Figure 4.11 – Processus de simulation de jeu à partir des données de mesure réalisées sur les composants [Lacroix *et al.*, 2015].

exemple le centre de la liaison élémentaire *sphère - coin de cube* n'est pas situé au centre de la sphère, mais au centre du cercle défini par l'intersection de la sphère et du plan passant par les points de contact de la sphère avec les trois plans du cube. Il n'est ainsi pas identifiable à partir des éléments géométriques d'un seul des composants. D'où la difficulté à définir un repère propre à chaque composant, construit à partir des mesures réalisées sur les *éléments de référence* d'un composant isolé.

La procédure suivie est identique à celle qui est utilisée dans le cas d'un assemblage flexible en ce qui concerne le choix des éléments géométriques à mesurer, la construction d'un repère propre au composant et l'intégration des données de mesure. Des maillages sont utilisés pour filtrer les mesures des composants au niveau de l'*interface jeu*. Ces maillages avec défauts sont alors représentatifs des défauts géométriques mesurés sur ces composants. Il ne sont cependant pas déformés au cours de la simulation d'assemblage en rigide.

4.2 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale complète, dans le cadre de la validation de l'évaluation de jeu par la simulation d'assemblage, se décompose en six étapes principales :

- ✦ La *mesure des composants* : Il s'agit premièrement de définir les éléments géométriques des composants qui permettent de caractériser le produit assemblé, et de réaliser l'acquisition de ces éléments.
- ✦ L'*intégration des données de mesure* dans la simulation : Il s'agit d'une part de construire un repère à partir des données de mesure des éléments de référence afin de pouvoir recalcr les mesures réalisées dans le repère de l'assemblage. Il s'agit d'autre part de réaliser le filtrage permettant d'intégrer les données de mesure au maillage de la surface à l'interface jeu.
- ✦ La *simulation du jeu* : Il s'agit de simuler l'assemblage des composants et d'extraire la géométrie du jeu simulé des résultats de simulation.
- ✦ L'*assemblage physique* : Il s'agit de réaliser physiquement l'assemblage entre les composants.
- ✦ La *mesure de jeu* : Il s'agit de venir évaluer, par la mesure, le jeu entre les composants assemblés.
- ✦ La *comparaison du jeu simulé au jeu mesuré* : Il s'agit de confronter les résultats de mesure et de simulation de jeu. Une procédure d'homogénéisation des données peut être nécessaire pour procéder à la comparaison.

Le processus de simulation de jeu est détaillé sur la *Figure 4.11*, et schématise les trois premières étapes. Celles-ci vont être détaillées dans les sections suivantes. Des étapes supplémentaires de fabrication des composants, de maillage et de détermination de la géométrie de la cale à fabriquer sont également visibles.

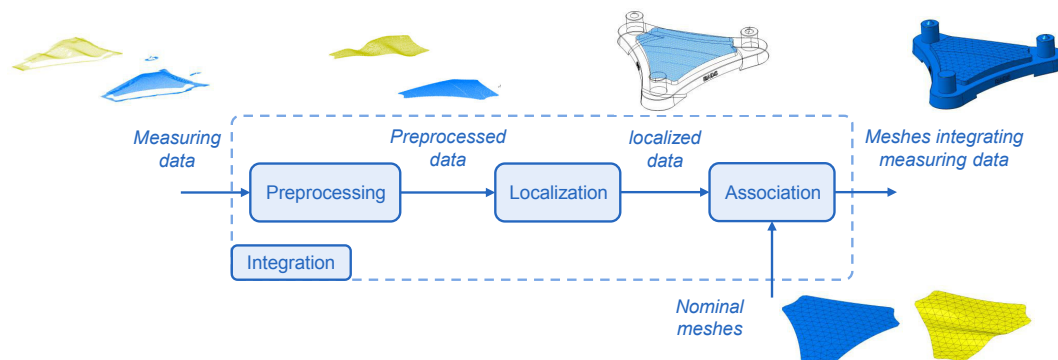


Figure 4.12 – Etape d’intégration des données de mesure au niveau des maillages [Lacroix *et al.*, 2015].

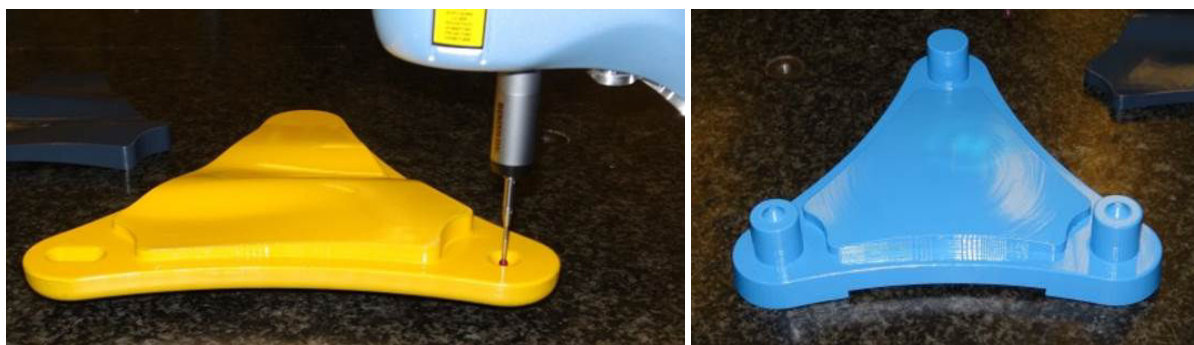


Figure 4.13 – Acquisition des éléments de référence du *couvercle* (à gauche) et de la surface à l’interface jeu du *socle* (à droite).

4.2.1 Mesure des composants

La mesure des composants s’effectue en deux temps. Il s’agit dans un premier temps de réaliser l’acquisition des éléments de référence, afin de construire pour chaque composant un *repère de mesure* \mathcal{R}_{mesure}^i . C’est ce repère qui permettra de recalibrer les données de mesure dans le repère propre à chaque composant $\mathcal{R}_{théorique}^i$, défini à partir du système de mise en position théorique.

Pour les deux composants, l’acquisition des éléments de référence et la construction du *repère de mesure* (\mathcal{R}_{mesure}^i) se déroule globalement de la même manière :

- ✈ Six points (deux par interface) sont palpés sur les surfaces réputées planes qui réalisent la liaison *plan - plan*. Un plan est associé à ces points de mesure par l’intermédiaire du critère des moindres carrés. La normale au plan construit définit l’axe *Z* du *repère de mesure* du composant.
- ✈ Du fait de sa faible hauteur, chaque cône est mesuré comme un cercle. Ainsi huit points sont palpés sur chaque cône, à altitude constante. Ces points sont projetés orthogonalement sur le plan précédemment construit. Un cercle est associé à ces points de mesure par l’intermédiaire du critère des moindres carrés. Le centre du cercle définit l’origine du *repère de mesure* du composant.
- ✈ La dernière direction est définie soit par le second cône (*socle*), soit par la rainure conique (*couvercle*). Dans le cas du *socle* un point est construit de la même manière à partir des points de mesure du cône, ce qui permet de définir l’axe *Y* du *repère de mesure* du composant. Dans le cas du *couvercle*, quatre points sont palpés sur chaque face de la rainure, à altitude constante. Ils sont projetés sur le plan précédemment construit. Un axe de la rainure est associé à ces points de mesure par l’intermédiaire du critère des moindres carrés. L’intersection de cet axe avec le cercle de centre l’origine du *repère de mesure* et de rayon la distance théorique entre les centres des deux liaisons *cône - cône* et *cône - rainure conique* définit un point, qui permet de tracer l’axe *Y* du *repère de mesure* du composant.

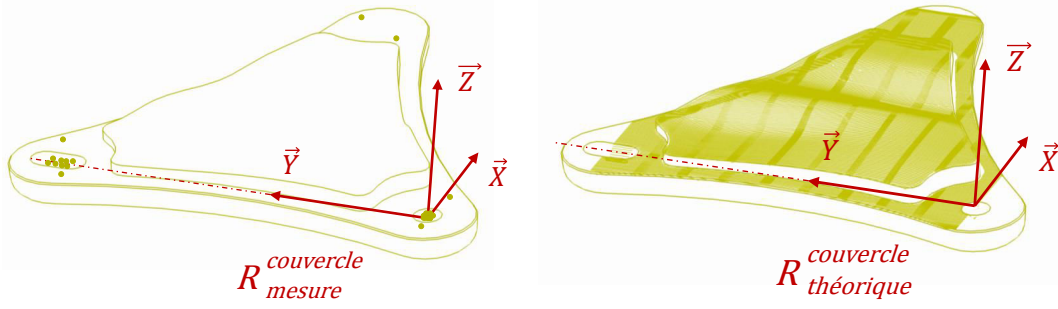


Figure 4.14 – Construction du repère de mesure $R_{\text{couvercle_mesure}}$ associé au couvercle (à gauche) et expression des données de mesure dans le repère théorique $R_{\text{couvercle_théorique}}$ (à droite).

La Figure 4.13 montre l'acquisition des éléments de référence. Celle-ci est effectuée à l'aide d'un palpeur mesurant monté sur le capteur LASER plan. Sur la Figure 4.14 est ensuite visible la construction du repère de mesure associé au composant à partir des points palpés. Le modèle CAO du composant est représenté afin de mieux visualiser la construction du repère de mesure associé. Il n'est cependant possible de représenter les points de mesure dans l'environnement CAO qu'après recalage des données de mesure dans le repère théorique propre à chaque composant $R_{\text{théorique}}^i$.

Il s'agit ensuite de mesurer les surfaces à l'interface jeu. Chaque surface est numérisée à l'aide du capteur LASER plan, d'une manière similaire à celle détaillée dans la Section 4.3 du Chapitre 3. Les données de mesure de chaque surface sont transformées dans le repère de mesure associé à chaque composant R_{mesure}^i , puis dans le repère théorique propre à chaque composant $R_{\text{théorique}}^i$. On observe ainsi sur la Figure 4.14 le nuage de points numérisé, correspondant à la surface à l'interface jeu, recalé dans le repère théorique du couvercle. La CAO est représentée seulement à titre d'illustration.

4.2.2 Intégration des données de mesure dans la simulation

Il s'agit ensuite, lorsque les données de mesure sont exprimées dans le repère théorique $R_{\text{théorique}}^i$ propre à chaque composant, de filtrer ces données afin de les intégrer aux maillages tracés au niveau des surfaces à l'interface jeu.

La procédure, illustrée sur la Figure 4.12, ne sera pas détaillée, car elle correspond à celle présentée en détails dans la Section 4.3 du Chapitre 3. La Figure 4.15 illustre le résultat du filtrage réalisé à partir du maillage de référence tracé sur la géométrie théorique du socle et du nuage de points brut numérisé sur la surface à l'interface jeu.

L'intégralité de la procédure est réalisée, c'est-à-dire le filtrage des données de mesure afin de générer un champ d'écarts partiel représentatif de la géométrie mesurée et la décomposition modale afin de générer un champ d'écarts complet.

Il est alors possible de réaliser la simulation de l'assemblage de ces données de mesure issues des composants isolés.

4.2.3 Simulation de jeu en rigide

La simulation d'assemblage en rigide consiste recalculer les données de mesure filtrées, exprimées dans les deux repères théoriques associés à chaque composant ($R_{\text{théorique}}^{\text{socle}}$ et $R_{\text{théorique}}^{\text{couvercle}}$), dans un repère d'assemblage commun ($R_{\text{théorique}}^{\text{assemblage}}$). Puisque la liaison entre les deux composants est considérée sans jeu, il n'y a qu'une configuration d'assemblage possible. Sur la Figure 4.16 sont illustrés les deux groupes de noeuds, dans le

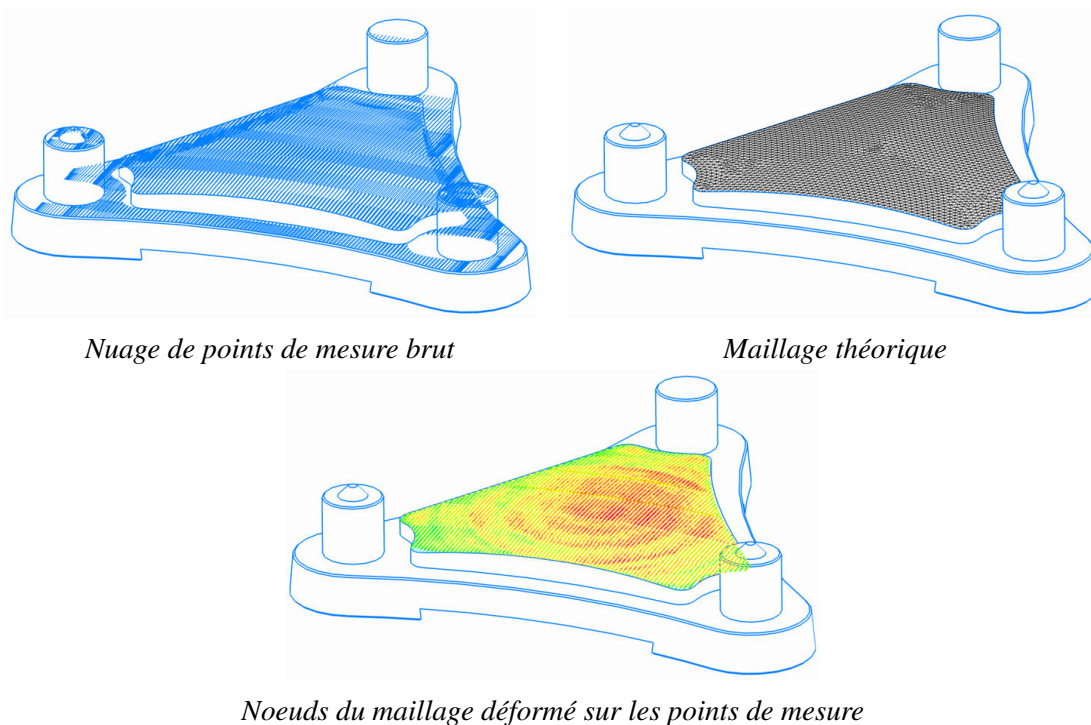


Figure 4.15 – Illustration de la procédure de filtrage mise en œuvre sur le socle.

repère du système de mesure (composant mesurés côte à côte sur le marbre), et dans le *repère théorique d'assemblage*.

A partir de là il est nécessaire d'extraire l'information concernant le *jeu simulé* entre les deux composants assemblés. Dans le cas présent on ambitionne de réaliser la cale qui va venir fermer le jeu. Il est ainsi nécessaire d'extraire une information de la simulation qui va permettre de concevoir la *cale sur mesure* qui va venir s'insérer dans l'assemblage.

Dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*, le procédé de fabrication de la cale développé est l'*impression 3D*. Plus précisément le système réalisant les cales se compose d'une tête d'*impression 3D* montée sur un bras robotisé, l'objectif étant de venir littéralement réaliser la cale sur le composant avant l'assemblage. Dans ce cas la cale doit être définie par son enveloppe surfacique dans le repère de la pièce support. Les problématiques concernant la stratégie de réalisation de la cale ne sont pas abordées dans ces travaux.

Les logiciels de pré-processing d'*impression 3D* nécessitent généralement des fichiers de type *.igs* ou *.stl* en entrée. En effet, le composant à réaliser est défini par son enveloppe surfacique, qu'elle soit continue ou discrète. Dans un soucis de continuité de la chaîne numérique, et afin de limiter les incertitudes d'évaluation du jeu simulé à partir des résultats de simulation d'assemblage, il semble judicieux d'extraire de la simulation un jeu compatible avec un format *.stl*, c'est à dire défini par un maillage enveloppe de la zone entre les deux composants. Sur cet exemple, le maillage déformé sur les points de mesure est directement utilisé pour réaliser une face de l'enveloppe surfacique de la cale.

Les deux faces de la cale sont ainsi obtenues à partir des maillages déformés sur les points de mesure des deux composants. Cette cale est directement définie dans le *repère de l'assemblage*. La Figure 4.17 illustre la face inférieure de la cale. Il est ensuite possible de générer une surface enveloppe fermée représentative de la géométrie de la cale à réaliser, à partir des maillages de ces deux faces et du contour de la cale. A noter qu'aucune donnée de mesure ne correspond directement au contour de la cale, puisque celui-ci n'existe pas lorsque les composants ne sont pas encore assemblés. Il est dans le cas présent défini à partir des noeuds en périphérie des maillages déformés des deux faces.

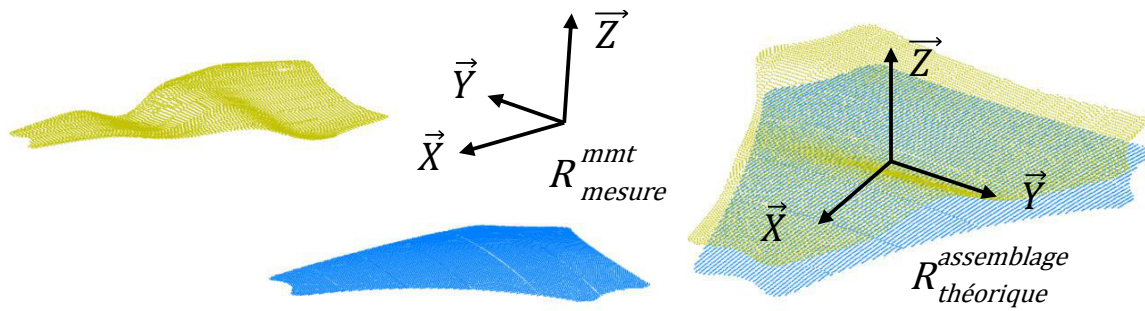


Figure 4.16 – Groupes de noeuds représentés dans le *repère du système de mesure* (à gauche) et dans le *repère d'assemblage* (à droite).

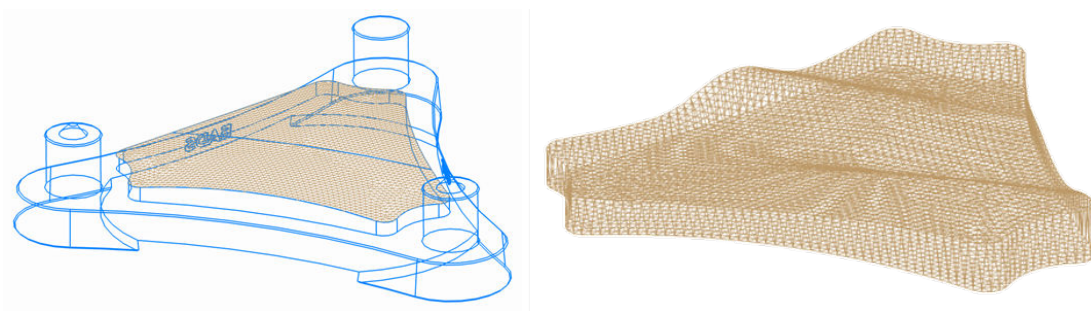


Figure 4.17 – Maillage déformé *.stl* de la surface à l'interface jeu du *socle* (à gauche) et cale *.stl* construite sur mesure à partir des maillages déformés des deux faces exprimés dans le *repère de l'assemblage* (à droite).

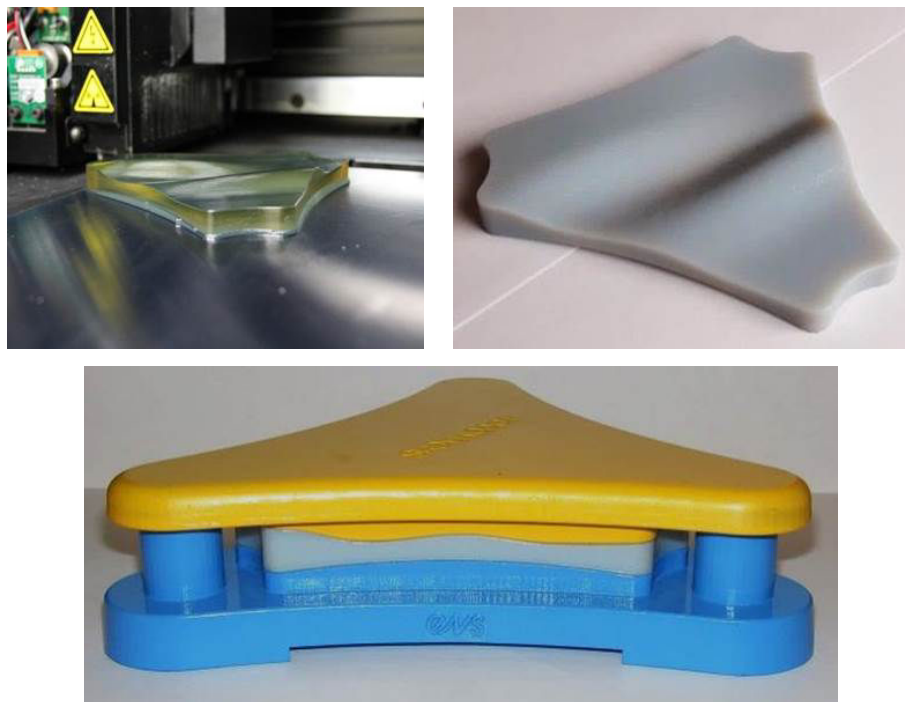


Figure 4.18 – Réalisation de la cale sur mesure par *impression 3D* et assemblage final.

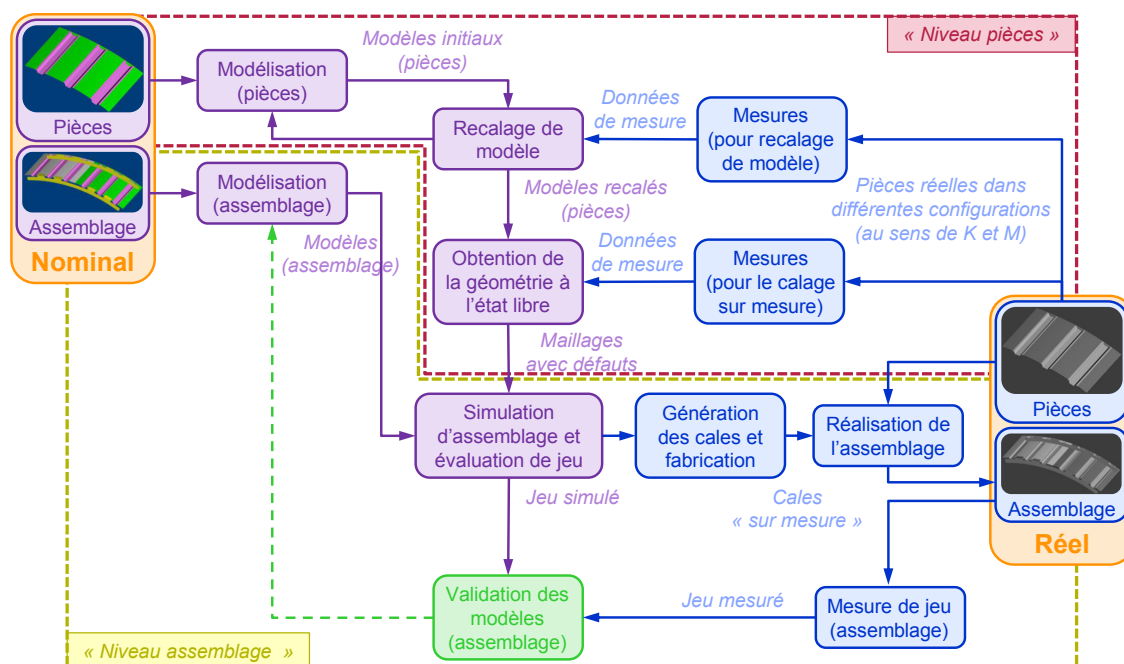


Figure 4.19 – Processus de validation de la simulation d'assemblage de composants flexibles.

La cale est ainsi réalisée par *impression 3D*. Pour l'instant l'effecteur prévu dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS* n'est pas opérationnel, la cale a donc été réalisée par une imprimante 3D classique. L'assemblage final est alors réalisé avec la cale sur mesure. Il est visible sur la Figure 4.18.

4.2.4 Simulation de jeu en flexible

La prise en compte de la flexibilité dans la simulation nécessite une modélisation adaptée. La modélisation géométrique à l'aide d'une représentation discrète a été introduite dans le cas de la simulation en rigide. La procédure d'intégration des données de mesure reste ainsi la même en flexible. Cependant il est nécessaire de modéliser également le comportement mécanique des composants lors de la mesure et lors de l'assemblage.

La Figure 4.19 illustre le processus de validation de la simulation d'assemblage de composants flexibles. Cette procédure distingue d'une part la procédure de validation nécessaire au niveau des composants afin de garantir l'évaluation de la géométrie réalisée. D'autre part il s'agit de la procédure de validation des modèles de simulation d'assemblage qui est attendue dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*.

Tout d'abord au niveau du composant, la modélisation du comportement mécanique va permettre, comme détaillé dans le Chapitre 2, de faire le lien entre les différents états géométriques du composant. Cela va permettre de déterminer la *géométrie à l'état libre* du composant afin d'introduire cette géométrie dans la simulation d'assemblage. Le résultat obtenu dépendra de la qualité des mesures, mais surtout de la modélisation du comportement mécanique et des valeurs des paramètres choisis.

Il est nécessaire dans un premier temps de valider le modèle choisi pour représenter le comportement mécanique de chaque composant flexible. Cela passe notamment par un recalage de modèle à partir de données de mesure, ces données devant refléter au mieux la variation d'état géométrique liée au comportement mécanique, afin de déterminer les valeurs des paramètres du modèle qui reflètent les données obtenues par la mesure. Ces aspects seront développés dans les Sections 3 et 4 du Chapitre 5.

Une fois les géométries à l'état libre des composants évaluées et les modèles mécaniques associés recalés, il est possible de procéder à la simulation d'assemblage. Celle-ci repose également sur des modèles de

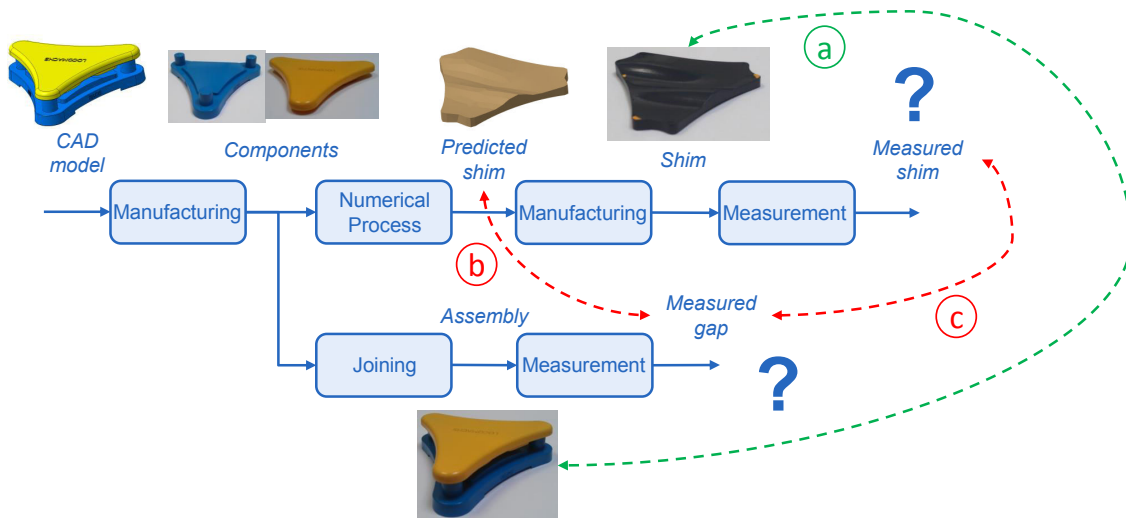


Figure 4.20 – Confrontations envisageables entre les résultats de simulation de jeu et l’assemblage réel [Lacroix *et al.*, 2015].

comportement, propres à l’assemblage, qui permettent de prendre en compte par exemple le contact unilatéral, le contact flexible - flexible ou le frottement. Ils ne sont pas détaillés ici, puisque l’objectif n’est pas de corriger ces modèles. Par contre on souhaite confronter les résultats de simulation obtenus à des résultats de mesure effectués sur un assemblage réel. Ces aspects seront abordés dans les *Sections 5* et *6* du *Chapitre 5*.

4.3 Synthèse

La procédure qui a été présentée dans les sections précédentes détaille le procédé de simulation d’assemblage, en rigide, à partir de la mesure des composants. Il illustre également la génération de la géométrie de la cale sur mesure qui permet de réaliser l’assemblage final.

Afin de comparer le jeu simulé au jeu réel, il est nécessaire de pouvoir évaluer ce dernier. Cette évaluation peut cependant se faire de différentes façons. En effet, il est possible d’observer sur la *Figure 4.20* les différentes comparaisons qui peuvent être réalisées afin de confronter les résultats de simulation au domaine du réel.

Afin de valider la géométrie de la *cale sur mesure* fabriquée, la réalisation de l’assemblage physique avec cette cale semble la méthode la plus judicieuse (*a*). Seulement difficile d’en tirer des conclusions pertinentes, c’est-à-dire plus riches que « les pièces s’assemblent » ou « les pièces ne s’assemblent pas très bien ». Les composants étant rigides, la moindre surépaisseur au niveau de la cale engendre une modification de la configuration de contact. En effet, le contact entre les composants ne se fait plus correctement par l’intermédiaire des *éléments de référence*, mais en partie par la cale. Il est alors possible de localiser ces contacts à l’aide d’une poudre ou d’un papier spécifique. Mais difficile de tirer des conclusions quantitatives. Idem si la cale fabriquée est légèrement moins épaisse que le jeu réel.

D’où la nécessité de pouvoir mesurer ce jeu, que ce soit pour le comparer à la géométrie du jeu simulé (*b*), ou à une mesure de la *cale sur mesure* réalisée (*c*) (ce qui permet dans ce cas d’intégrer les performances du procédé de réalisation de la cale dans la boucle de validation).

Dans le cas présent, la mesure de jeu à l’aide des méthodes sélectionnées dans ce chapitre n’a pas été mise en œuvre. La validation qualitative a cependant été réalisée. Il s’avère que la cale fabriquée sur mesure est légèrement trop épaisse. Elle engendre un décollement de l’ordre de 0.1mm du couvercle au niveau d’un des trois plots réalisant la liaison *plan - plan*. Cette valeur semble relativement faible vis-à-vis des dimensions du jeu à combler (5 à 15mm d’épaisseur, côté du triangle de 150mm environ).

Les réflexions présentées dans cette *Section 4*, ainsi que la mise en œuvre de la procédure de simulation de jeu en rigide à partir de la mesure des composants, ont notamment fait l'objet d'une communication à la conférence *Computer Aided Tolerancing* du *CIRP* en Mai 2014. Les travaux présentés ont également été sélectionnés afin d'être publiés dans la revue *Procedia CIRP* [Lacroix *et al.*, 2015].

5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter l'évaluation de jeu dans le contexte des travaux de thèse. La validation expérimentale de la simulation de jeu nécessite le choix d'une méthode de mesure de jeu adaptée. Un état de l'art a permis de présenter les différentes méthodes utilisées dans l'industrie aéronautique actuellement, et de mettre en avant les difficultés liées à leur mise en œuvre. Des méthodes innovantes de mesure sans contact notamment ont également été étudiées, et ont montré leur intérêt dans le cadre de la mesure de jeu au sein d'un assemblage de composant flexible.

Afin de procéder à la validation de la simulation de jeu par la mesure sur le support expérimental du *Chapitre 5*, un choix de méthode de mesure de jeu a été effectué. Ce choix s'est notamment fait sur l'accessibilité à la technologie concernée, et sur différents critères qualitatifs permettant de classer les différentes méthodes retenues. Ainsi la mesure de jeu sera réalisée dans le chapitre suivant à l'aide de la *méthode de mesure par différence*, qui semble la plus adaptée dans le contexte de l'assemblage flexible. La *méthode de mesure par prise d'empreinte directe puis mesure de l'empreinte sur l'un des composants* sera également réalisée afin d'observer son influence sur l'état géométrique de l'assemblage lors de la prise d'empreinte.

Le processus de simulation de jeu a ensuite été réalisé en rigide, sur un support expérimental conçu pour l'occasion. Il permet d'illustrer la procédure sur un cas simple, pour lequel l'état géométrique des composants est considéré comme constant. Cette hypothèse permet de simplifier considérablement le modèle nécessaire pour réaliser la simulation, puisqu'il s'agit uniquement de mouvements de corps rigides à appliquer aux composants. Cela permet de valider le choix des éléments géométriques mesurés et l'intégration des données de mesure au sein du processus de simulation d'assemblage. Le jeu entre les composants est simulé, et permet de définir la géométrie de la cale à fabriquer pour réaliser le calage de l'assemblage. Cette cale est fabriquée sur mesure, et des pistes sont données afin de vérifier sa conformité.

Le passage au flexible est alors possible. Il faut pour cela que les modèles de comportement des composants permettent de prendre en compte cette souplesse. La première étape consistera à mesurer les composants souples, et à compenser les effets de l'environnement sur la géométrie mesurée. Il sera nécessaire de s'assurer de la validité de cette compensation, avant de pouvoir intégrer les données de mesure réalisées à la simulation d'assemblage. Celle-ci sera alors réalisée et permettra d'obtenir une représentation du jeu simulé entre les composants. Afin de valider les modèles d'assemblage utilisés par l'outil *AnaTolerFlex* pour la simulation, il sera alors nécessaire de comparer ce jeu simulé à un jeu mesuré sur l'assemblage réel, à l'aide des méthodes retenues dans ce chapitre.

Chapitre **5**

Validation expérimentale des travaux de thèse

Sommaire

1	Introduction	123
2	Caractéristiques du support expérimental	124
2.1	Support expérimental	124
2.1.1	Démonstrateur du projet <i>LOCOMACHS</i>	124
2.1.2	Support expérimental conçu pour la validation	125
2.2	Modélisation du problème d'assemblage	127
2.2.1	Modélisation géométrique et mécanique	127
2.2.2	Scénario d'assemblage	129
3	Evaluation de caractéristiques géométriques	132
3.1	Description de la mise en œuvre	132
3.2	Validation expérimentale de la méthode	135
3.2.1	Validation par différence de deux géométries à l'état libres évaluées dans deux configurations différentes	135
3.2.2	Validation par comparaison à la géométrie à l'état libre obtenue par retournement	137
4	Analyse de sensibilité	142
4.1	Sélection des paramètres influents	143
4.2	Sensibilité au niveau de l'acquisition et du traitement	144
4.2.1	Données concernant le système d'acquisition	144
4.2.2	Répétabilité de génération d'un champ d'écarts	144
4.2.3	Effets de la thermique sur le capteur	145
4.2.4	Influence du recalage rigide	150
4.2.5	Dimension du filtre	151
4.3	Sensibilité au niveau du recalage non rigide	152
4.3.1	Simplification et idéalisation de la géométrie	153
4.3.2	Perturbations extérieures	154
4.3.3	Paramètres matériau	157
4.3.4	Position d'un appui	161
4.4	Synthèse et définition d'un cadre pour la mise en œuvre de la méthode	162
5	Simulation de jeu	163
5.1	Modélisation de l'assemblage en vue de la simulation	164
5.2	Simulation d'assemblage et évaluation du jeu simulé	166
5.3	Analyse des résultats	169
6	Assemblage expérimental et mesure du jeu	170
6.1	Description de l'assemblage expérimental	170
6.2	Evaluation du jeu	170
6.2.1	Mesure par prise d'empreintes	172
6.2.2	Mesure par différence	174
6.3	Analyse des résultats	176
6.4	Comparaison des jeux simulés et mesurés	179
7	Conclusion	181

1 Introduction

Dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*, une validation expérimentale de l'outil de simulation d'assemblage *AnaTolFlex* est attendue. Il est ainsi nécessaire de réaliser un assemblage expérimental qui permet de confronter des résultats de simulation à des résultats de mesures réalisées sur cet assemblage physique. Dans le contexte du calage aéronautique, confronter un résultat de simulation de jeu à une mesure de jeu permettrait de conclure quant aux performances de l'outil de simulation. Cela permettrait également de valider les méthodes d'évaluation de jeu par la mesure qui ont été étudiées dans le *Chapitre 4*.

Pour réaliser la simulation d'assemblage à partir de données de mesure acquises sur des composants réels, il est nécessaire de réaliser l'acquisition de ces données, et de restituer ces données en faisant abstraction de la configuration de mesure des composants. La méthode qui a été étudiée dans le *Chapitre 3* doit ainsi également faire l'objet d'une validation expérimentale, afin de garantir que les données concernant les géométries à l'état libre et le comportement mécanique des composants sont suffisamment proches du réel pour que la simulation d'assemblage réalisée à partir de ces données soit réaliste.

La section 2 présente ainsi le *démonstrateur* du projet européen *LOCOMACHS*, et le processus d'assemblage associé, afin de mettre en avant les scénarios qui ont été mis au point pour appliquer les résultats des travaux réalisés dans le cadre du projet. Le support expérimental conçu afin de valider les travaux de thèse est ensuite présenté. La modélisation de l'assemblage est détaillée, notamment la modélisation géométrique et mécanique, et la séquence d'assemblage retenue.

La section 3 présente l'*évaluation de caractéristiques géométriques sur un composant souple* du support expérimental. La mise en œuvre de la méthode ayant déjà été présentée dans le *Chapitre 3*, il s'agira ici d'exposer la validation expérimentale de celle-ci. Deux procédures de validation expérimentale de la méthode sont proposées. Celles-ci sont détaillées sur un composant souple du cas d'étude. Les résultats sont alors analysés et permettent de souligner les difficultés à interpréter les résultats obtenus.

La section 4 se consacre alors à une *analyse de sensibilité* afin d'approfondir la validation expérimentale. Les paramètres jugés les plus influents au niveau de la mesure et de la simulation sont sélectionnés et leurs influences sont étudiées. Les résultats sont analysés et permettent de définir un cadre pour la mise en œuvre de la méthode afin de garantir la qualité des résultats obtenus. Ces résultats sont également utilisés afin de corriger les résultats obtenus et améliorer les performances de la méthode mise en œuvre.

La section 5 détaille ensuite l'opération de *simulation d'assemblage*. La procédure mise en œuvre afin de modéliser celui-ci dans l'environnement du logiciel *AnaTolFlex* est présentée. La simulation d'assemblage est alors réalisée à partir des données de mesure, et le jeu entre les composants est évalué. Les résultats obtenus sont analysés.

La section 6 présente succinctement la *réalisation de l'assemblage physique*, en soulignant les précautions qui ont été prises. Les jeux sont alors évalués à l'aide des méthodes qui ont été étudiées dans le *Chapitre 4*. Les résultats de mesure de jeux sont comparés aux résultats de simulation de jeux. Des conclusions sont tirées quant à la mise en œuvre expérimentale réalisée, et quant aux performances de l'outil de simulation d'assemblage développé dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*.

Ce chapitre est relativement conséquent vis-à-vis des chapitres précédents, car il regroupe toute la partie concernant la validation expérimentale des travaux. Ce choix s'est fait dans le souci d'illustrer cette validation sur un seul et même support expérimental, reflétant les problématiques industrielles. Les sections 3 et 4 correspondent ainsi aux travaux présentés dans le *Chapitre 3*, et les sections 5 et 6 aux travaux présentés dans le *Chapitre 4*.

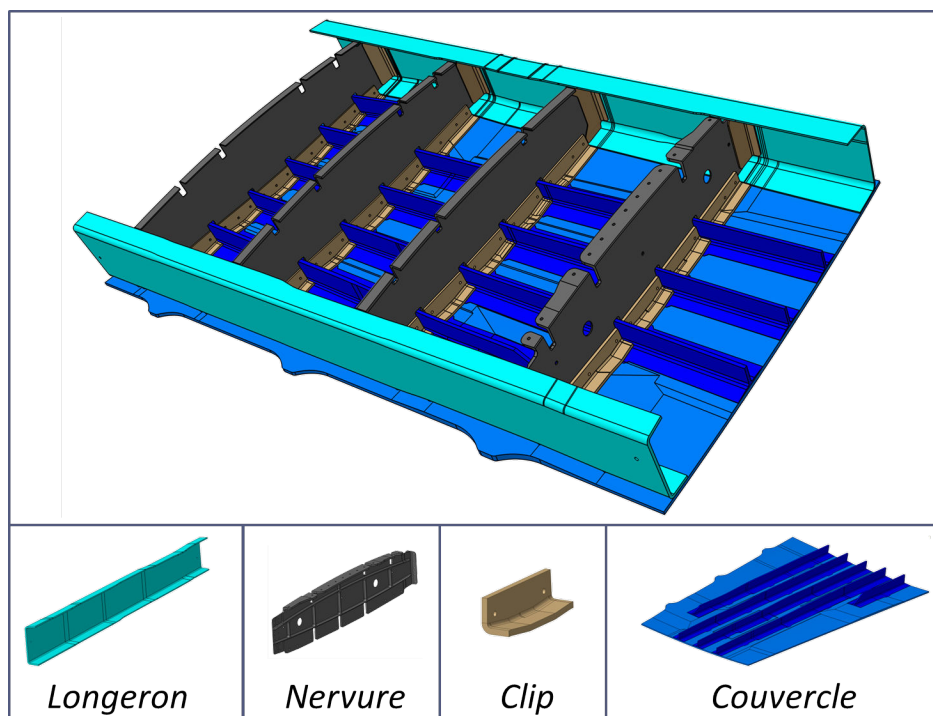


Figure 5.1 – Sous-ensemble de structure aéronautique (démonstrateur *LAWiB*) [LOCOMACHS, 2012].

2 Caractéristiques du support expérimental

Afin de mettre en application les travaux de thèse présentés dans les chapitres précédents, un support expérimental a été conçu. Celui-ci, représentatif des problématiques concernant le calage aéronautique, est présenté dans cette section.

Il est ainsi question dans un premier temps des caractéristiques géométriques et mécaniques du cas d'étude. Dans un second temps il s'agira de détailler la modélisation du problème d'assemblage, modélisation qui concernera la géométrie, les modèles de comportement associés à chaque composant, mais également la séquence et les technologies d'assemblage retenues.

2.1 Support expérimental

2.1.1 Démonstrateur du projet *LOCOMACHS*

Le support de validation des travaux dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS* est celui qui est visible sur la *Figure 5.1*. Ce démonstrateur *LAWiB* (*Lean Assembled Wing Box*), est une portion d'aile qui mesure approximativement quatre mètres de long. Les composants sont entièrement en matériaux composites. La structure de cet assemblage est réalisée à l'aide des *longerons* et des *nervures*. Les deux *couvercles* qui constituent la peau de l'aile sont ensuite assemblés sur la structure, la liaison étant réalisée au niveau des *longerons* et au niveau des pieds des *nervures* ou des *clips*.

Dans la pratique, la procédure d'assemblage qui sera mise en œuvre sur cette structure, illustrée en *Annexe B*, est la suivante :

- ✈ (1) Positionnement des deux *longerons* et du *couvercle* supérieur sur les outillages.
- ✈ (2) Mesure de la face supérieure des *longerons*, de la face inférieure du *couvercle*, (et de toutes les autres entités nécessaires à la simulation de l'assemblage des géométries mesurées), et simulation du jeu entre le *couvercle* supérieur et les *longerons*.

- ✈ (3) Réalisation des cales sur mesure, et assemblage du *couvercle* supérieur avec les cales (assemblage définitif sur le *longeron* arrière, et temporaire sur le *longeron* avant).
- ✈ (4) Positionnement successif des *nervures* par rapport au *longeron* arrière et au *couvercle* supérieur, et fixation.
- ✈ (5) Positionnement successif des *clips* par rapport à chaque *nervure* et au *longeron* avant, et fixation.
- ✈ (6) Positionnement du *couvercle* inférieur sur son outillage.
- ✈ (7) Mesure de la face inférieure des *longerons*, de la face supérieure du *couvercle*, (et de toutes les autres entités nécessaires à la simulation de l'assemblage des géométries mesurées), et simulation du jeu entre le *couvercle* inférieur et les *longerons*.
- ✈ (8) Réalisation des cales sur mesure, et assemblage du *couvercle* inférieur avec les cales.

Cette séquence n'est pas complètement détaillée, elle permet seulement d'illustrer la problématique concernant la simulation de jeu et le calage. En effet, elle ne présente pas entre autres la réalisation des trous qui permettront le passage de éléments de fixation, et les montages et démontages successifs des composants qui permettent ces réalisations.

Les opérations (2) (et (7)) de mesure des composants, et de simulation de jeu à partir des données de mesure, doivent remplacer les opérations actuellement réalisées. Dans le détail il s'agit de remplacer les opérations de :

- ✈ Positionnement du *couvercle* sur les *longerons*.
- ✈ Détection des points de contact entre le *couvercle* et les *longerons*.
- ✈ Pré-assemblage du *couvercle* sur les *longerons* à l'aide d'épingles de pré-assemblage au niveau des points de contact.
- ✈ Mesure des jeux entre le *couvercle* et les *longerons*.
- ✈ Démontage du *couvercle*.

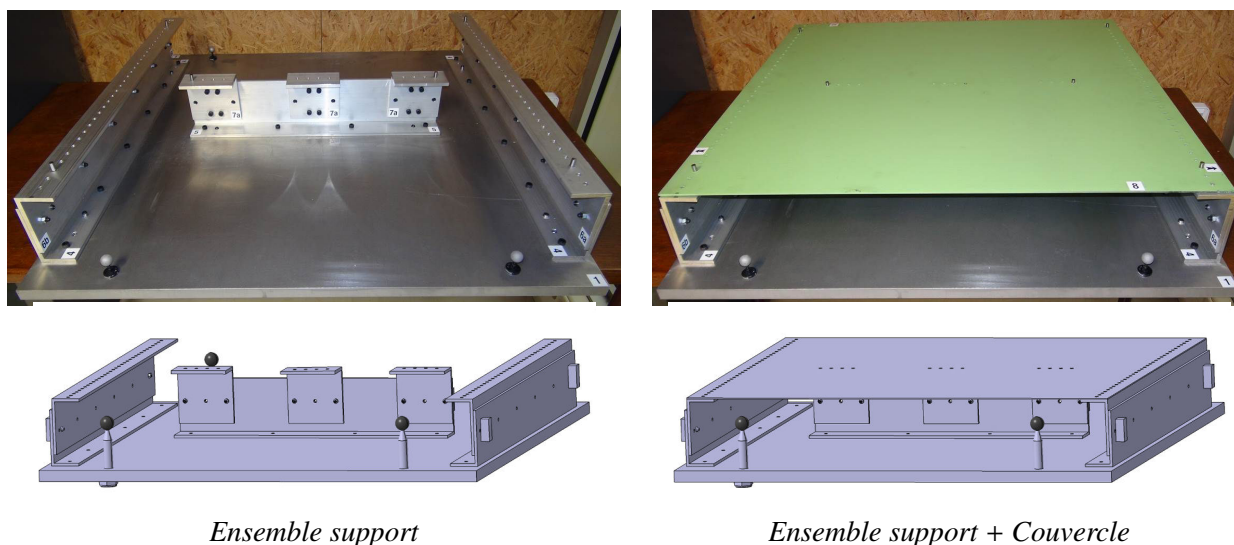
Afin de respecter le processus d'assemblage actuel, il y a ainsi deux étapes à respecter dans la simulation de jeu. Une première étape qui consiste à simuler l'assemblage afin de localiser les points de contact entre les composants. La configuration de pré-assemblage est alors déterminée par rapport au résultat de cette première étape. La seconde étape consiste alors à simuler l'assemblage dans la configuration de pré-assemblage déterminée, et d'évaluer le jeu aux interfaces entre les composants.

Le démonstrateur *LAWiB* doit permettre la validation de nombreux travaux menés dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*. Il doit notamment mettre en avant les apports dans les domaines de la conception et de la fabrication. De ce fait, il n'existe pas physiquement au moment de la rédaction de ce manuscrit. Ainsi une maquette, représentative des problématiques liées à la simulation d'assemblage et au calage, a été conçue afin de pouvoir valider expérimentalement les travaux de thèse. Ce support expérimental est présenté dans la section suivante. Les travaux réalisés seront également appliqués sur le démonstrateur *LAWiB* à la fin du projet *LOCOMACHS*.

2.1.2 Support expérimental conçu pour la validation

Un support expérimental a été conçu, afin de valider les travaux de thèse, mais également de préparer la démonstration de ces travaux dans le cadre du projet *LOCOMACHS* sur le démonstrateur *LAWiB*. Ce support se veut ainsi représentatif des problématiques industrielles d'assemblage concernant le calage.

Le support expérimental, qui s'inspire donc fortement d'un assemblage typique du domaine industriel aéronautique, est visible sur la *Figure 5.2*. Il a été entièrement conçu dans le cadre de ces travaux de thèse, avec pour objectif la validation des travaux sur la thématique de la simulation d'assemblage en vue du calage. Il a été réalisé par l'entreprise *Bombardier*. La nomenclature complète est disponible en *Annexe C*.



Ensemble support

Ensemble support + Couvercle

Figure 5.2 – Support expérimental de validation des travaux de thèse.

Ce support expérimental se compose d'un sous-ensemble considéré comme rigide, l'*ensemble support*. Il est constitué de différents composants, dont le détail est donné en *Annexe C*. Sur ce support vient s'assembler le *couvercle*. Les caractéristiques principales de ce support expérimental sont les suivantes :

- ✈ Géométrie représentative des structures aéronautiques : Le support expérimental met en scène l'assemblage d'un composant relativement souple (*couvercle*) sur une structure relativement rigide (*ensemble support*). Il permet de considérer la dernière phase de l'assemblage, celle qui correspond à l'assemblage de la peau de l'aile sur la structure déjà assemblée.
- ✈ Contacts locaux et globaux : Le support expérimental permet de représenter des contacts relativement étendus, au niveau des *longerons*, et des contacts plus localisés, au niveau des *clips* et des pieds des *nervures*. Ces deux types d'interfaces sont présentes sur le démonstrateur *LAWiB*.
- ✈ Modularité : Le support expérimental a été conçu de manière à permettre un changement facile des composants supérieurs de l'*ensemble support* (*longerons* et *clips*). Cela offre la possibilité de varier à la fois les géométries et les matériaux de ces composants, de façon à modifier le comportement de l'assemblage et la géométrie des jeux.
- ✈ Matériaux : Différents matériaux sont utilisables, afin de modifier le comportement mécanique ou l'aspect de surface des composants. Sont ainsi à disposition des *longerons* en alliage d'acier, en alliage d'aluminium ou en matériau composite, des *clips* en alliage d'acier ou en alliage d'aluminium, et des *couvercles* en alliage d'aluminium ou en matériau composite.
- ✈ Jeux de nature différente : La géométrie nominale fait état d'un jeu nul au niveau des *longerons* et d'un jeu non nul au niveau des *clips*. Cela permet de considérer le jeu au niveau des *longerons* comme un jeu résiduel et le jeu au niveau des *clips* comme un jeu de réglage.
- ✈ Sphères de référence : Le support expérimental est équipé de trois sphères de référence, qui doivent permettre de recalibrer entre elles les mesures qui sont réalisées sur celui-ci.

Ce cas d'étude doit ainsi permettre dans un premier temps de valider les travaux de thèse, concernant d'une part l'évaluation par la mesure et la simulation de caractéristiques sur des composants souples, et d'autre part la mesure de jeu dans un assemblage flexible.

Il doit également permettre dans un second temps la démonstration des travaux dans un cadre plus large. Il doit en effet être utilisé comme démonstrateur en interne dans l'entreprise *Airbus Group*. Il sera également présenté dans le cadre du meeting annuel au sein du projet *LOCOMACHS* afin d'illustrer l'avancée des travaux concernant la simulation d'assemblage et le calage sur mesure.

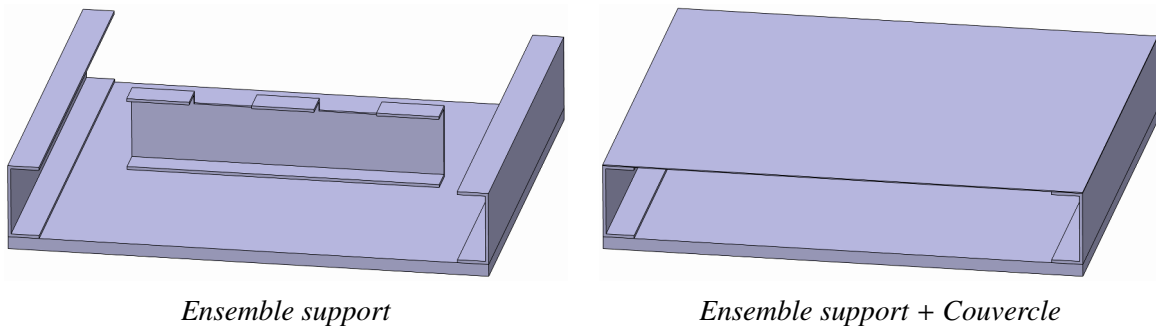


Figure 5.3 – Géométrie simplifiée du support expérimental.

2.2 Modélisation du problème d'assemblage

2.2.1 Modélisation géométrique et mécanique

Malgré la relative simplicité géométrique de ce support, il est nécessaire de procéder à une idéalisation et une simplification de sa géométrie. Cela va permettre l'utilisation d'un modèle *Eléments Finis* relativement simple. Le modèle du produit sera réduit (nombre de composants, nombre de liaisons) et la géométrie des composants sera plus simple. Dans le contexte de la simulation d'assemblage, ces étapes sont nécessaires au niveau des composants afin de ne pas obtenir un modèle de l'assemblage trop important.

Le support expérimental a été conçu de façon à ce que l'*ensemble support* puisse être considéré comme rigide. Ainsi il peut être considéré comme monobloc dans le cadre de la simulation d'assemblage. Dans les faits il est nécessaire de distinguer les composants auxquels on souhaite associer des données de mesure, puisque ceux-ci doivent être maillés. On distinguera ainsi la *plaque support* des autres composants de l'*ensemble support*. On considèrera ainsi que les *longerons* et leur support sont monobloc, ainsi que les *clips* et leur support. L'assemblage se résume à un assemblage de cinq composants, visibles sur la Figure 5.3.

Ces cinq composants sont les suivants :

- ✦ La *plaque support* : elle est considérée comme rigide et sans défauts géométriques.
- ✦ Les deux ensembles *longeron + base longeron* : ils sont considérés comme flexibles, et avec défauts géométriques au niveau de la face supérieure des *longerons*.
- ✦ L'ensemble *clips + base clips* : il est considéré comme flexible, et avec défauts géométriques au niveau de la face supérieure des *clips*.
- ✦ Le *couvercle* : il est considéré comme flexible et avec défauts géométriques.

Les ensembles *longeron + base longeron* et *clips + base clips* sont considérés comme flexibles dans la modélisation, afin de pouvoir introduire des défauts géométriques, mais du fait des épaisseurs importantes de ces composants, et des efforts normalement mis en jeu lors de l'assemblage, leurs déformées seront extrêmement faibles (flèches inférieures à 0.1mm), et seront donc négligeables par rapport à celles du couvercle.

La simplification de la géométrie entraîne également la disparition de certaines entités géométriques des composants, comme par exemple les trous de passage des éléments de fixation. Cette simplification est nécessaire afin de simplifier la modélisation lors du passage à la géométrie discrète. Les informations concernant la position de ces trous sont tout de même conservées, soit en construisant un maillage *Eléments Finis* dont chaque trou est représenté par un noeud du maillage, soit en construisant si nécessaire des noeuds virtuels par projection des centres des trous sur le maillage.

Cette géométrie simplifiée permet ensuite de définir une géométrie discrétisée, visible sur la Figure 5.4. Les *Eléments Finis* choisis sont des éléments coques. En effet, l'idéalisation de la géométrie du couvercle tend à considérer un modèle plaque plutôt qu'un modèle volumique. Ce modèle est relativement bien adapté à la problématique car dans la pratique seule une des faces des composants est mesurée. Cela permet de

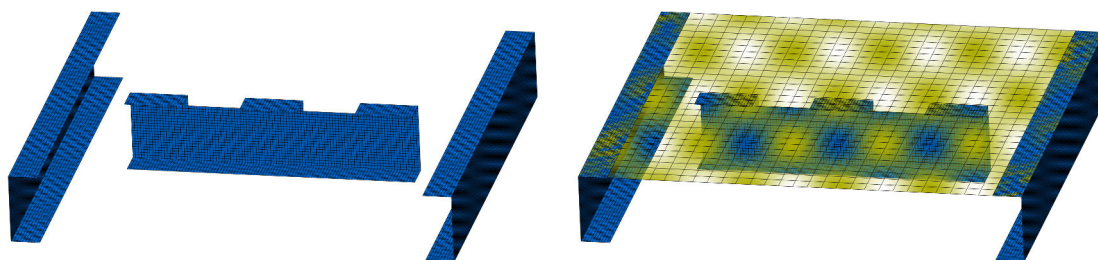


Figure 5.4 – Géométrie discrétisée du support expérimental.

considérer ce défaut de forme tout en conservant une épaisseur constante, définie à la valeur théorique ou à une valeur corrigée.

Le maillage tracé est relativement régulier. Pour simplifier la définition du problème, on impose le tracé du maillage par les points importants du point de vue de la modélisation du problème (notamment les trous servant à la mise et au maintien en position, qui seront définis par la suite). On souhaite pouvoir représenter au niveau du *couvercle* un défaut géométrique et une déformée présentant quatre oscillations dans les deux directions principales. Si on se réfère à la *Section 3.3* du *Chapitre 3*, cela veut dire qu'il est nécessaire de définir 28 mailles minimum suivant chaque direction. Concernant les *longerons* et les *clips*, qui sont plus étroits, on définit 10 mailles dans la largeur. Cela permet d'observer un défaut géométrique ayant une oscillation suivant cette direction (le composant étant considéré rigide, il n'y a pas de déformée à représenter). Il est important de noter qu'à ce stade, la définition des maillages est contrainte par l'environnement logiciel. Il n'est en effet pas possible à l'heure actuelle de générer des maillages manuellement et de les importer dans l'environnement. L'utilisation du mailleur intégré au logiciel *Catia V5* est une contrainte imposée.

Avec un peu de recul, l'idéal serait d'utiliser deux maillages par composant. Un maillage d'une densité relativement importante représentant les données de mesure filtrées, et un maillage de densité beaucoup plus faible représentant la géométrie théorique de la pièce qui serait le maillage support. Il s'agirait également de définir des contraintes cinématiques entre les deux maillages. Cela permettrait de réaliser la simulation *Eléments Finis* sur le maillage support et d'en déduire la déformée du maillage représentant les mesures par l'intermédiaire des contraintes cinématiques imposées. Cette solution n'est cependant pas envisageable pour l'instant avec le mailleur intégré au logiciel *Catia V5*.

Les défauts géométriques et les déformées, déterminées par la mesure, sont filtrés à l'aide de la procédure détaillée dans le *Chapitre 3*. Cette procédure de filtrage permet notamment d'obtenir un champ d'écarts représentatif de la géométrie de la forme réelle contrainte évaluée par la mesure, exprimé aux noeuds du maillage théorique de chaque composant mesuré. Ce champ d'écarts est alors injecté dans le modèle de simulation. La procédure de filtrage proposée dans le cadre de ces travaux de thèse permettra à terme de développer un outil permettant de générer ce champ d'écarts directement dans l'environnement logiciel *CatiaV5*.

Le modèle mécanique utilisé est un modèle plaque. Il s'agit alors de renseigner l'épaisseur et les paramètres matériau. L'épaisseur des composants est mesurée au micromètre, et considérée comme constante. Les paramètres matériau sont pris à leur valeur nominale dans un premier temps (la valeur nominale étant la valeur de base d'une famille de matériau issue de la bibliothèque du logiciel *Catia V5*). Certains de ces paramètres seront recalés à partir des résultats de mesure. Cet aspect sera détaillé dans la *Section 4*.

De plus la géométrie simplifiée et idéalisée est légèrement différente de la géométrie des composants physiques (disparition des trous, fusion de composants). Il est ainsi nécessaire de faire l'hypothèse que ces modifications auront un impact négligeable sur les résultats de simulation. L'expertise d'un spécialiste de bureau d'étude peut être nécessaire pour garantir ces simplification et idéalisation. Dans ce cas il a été vérifié que la non prise en compte des trous a un impact négligeable (variation d'amplitude de déformée inférieure à



Figure 5.5 – Scénario d'assemblage mis en œuvre sur le support expérimental.

0.2mm). A noter que le recalage de certains paramètres du modèle peut permettre de compenser les effets de ces simplification et idéalisation, dans le cas où les modifications réalisées auraient un impact sur le résultat de simulation.

2.2.2 Scénario d'assemblage

Le scénario d'assemblage défini, qui s'inspire fortement du scénario d'assemblage du démonstrateur LAWiB, est illustré sur la Figure 5.5. Il se décompose en trois étapes principales, qui sont les suivantes :

- (1) Positionnement du *couvercle* sur l'*ensemble support*. Il s'agit alors de déterminer les points de contact (« *hard points* ») entre les composants afin de venir placer les éléments de fixation temporaires au niveau de ces points.
- (2) Pré-assemblage du *couvercle* sur l'*ensemble support*. Les épingles de pré-assemblage sont mises en place au niveau des points déterminés précédemment. Les jeux entre les *clips* et le *couvercle* sont déterminés à cette étape.
- (3) Assemblage du *couvercle* et des cales sur l'*ensemble support*. Les cales ont été fabriquées sur mesure, et sont intégrées à l'assemblage définitif.

Ces trois étapes, fortement inspirées d'un cas industriel, vont permettre de définir une procédure de validation de la simulation d'assemblage sur un cas typique. Elles restent également relativement simples (nombre de composants limité, géométries simples, matériaux métalliques), ce qui permettra de s'assurer de la maîtrise de nombreux éléments. Confronter les résultats de simulation aux résultats expérimentaux permettra alors de qualifier les performances de l'outil logiciel.

La séquence d'assemblage mise en œuvre expérimentalement est détaillée sur la Figure 5.6. Les liaisons auxquelles fait référence cette séquence sont visibles sur la Figure 5.7. Les éléments géométriques auxquels fait référence le *Graphe Orienté de Contact* du produit sont définis sur les Figures 5.8 et 5.9.

Les jeux représentés par les exigences J_1 , J_2 et J_3 sur la Figure 5.7 sont considérés comme des jeux de réglage. Ils existent dès la phase de conception du produit, et ont pour but de rattraper les variations géométriques du produit assemblé. L'objectif est donc de réaliser les cales sur mesure qui vont venir combler

ces jeux au moment de l'assemblage final.

Afin de conserver de la clarté au niveau de la description du scénario d'assemblage, les opérations de mesure ne sont pour l'instant pas décrites dans la gamme d'assemblage. Elle seront intégrées par la suite dans le cadre de la simulation d'assemblage à partir de données de mesure, et dans le cadre de la mesure de jeu pour la validation de la simulation d'assemblage.

Ainsi deux séquences seront menées en parallèle afin de procéder à la validation, l'une concernant la simulation d'assemblage à partir de données de mesure, et l'autre concernant l'assemblage physique et la mesure de jeu. Les sections suivantes traitent des opérations de mesure relatives à ces deux séquences.

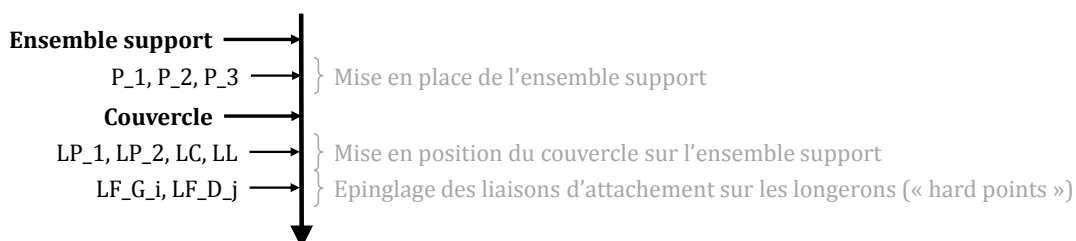


Figure 5.6 – Séquence d'assemblage mise en œuvre expérimentalement sur le support expérimental (phases n°1 et n°2).

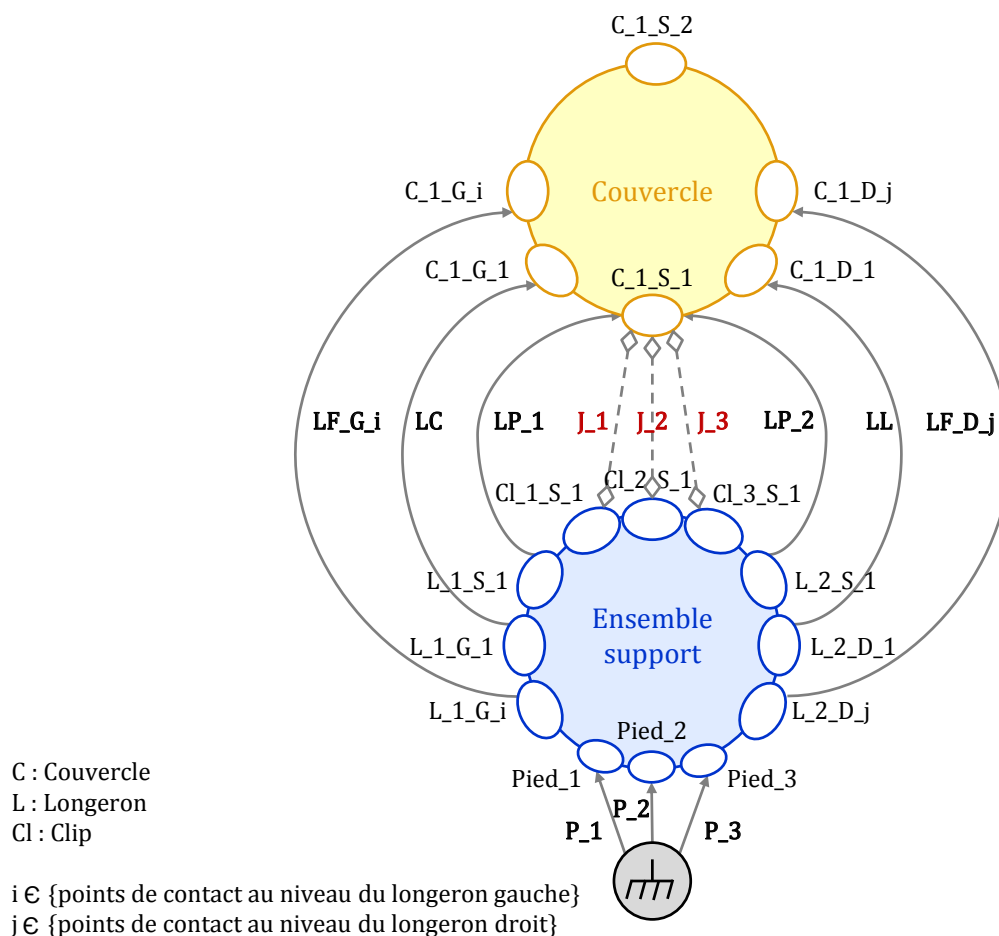


Figure 5.7 – Graphe Orienté de Contact du support expérimental.

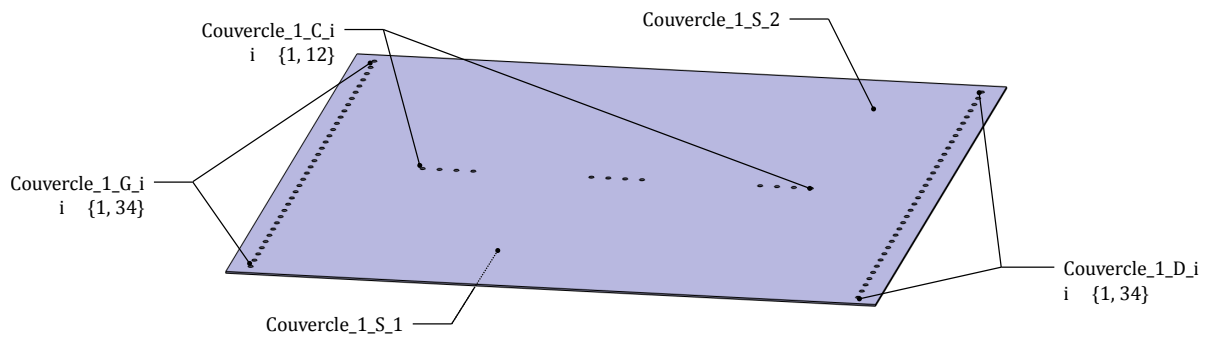


Figure 5.8 – Détail des éléments géométriques du *couvercle*.

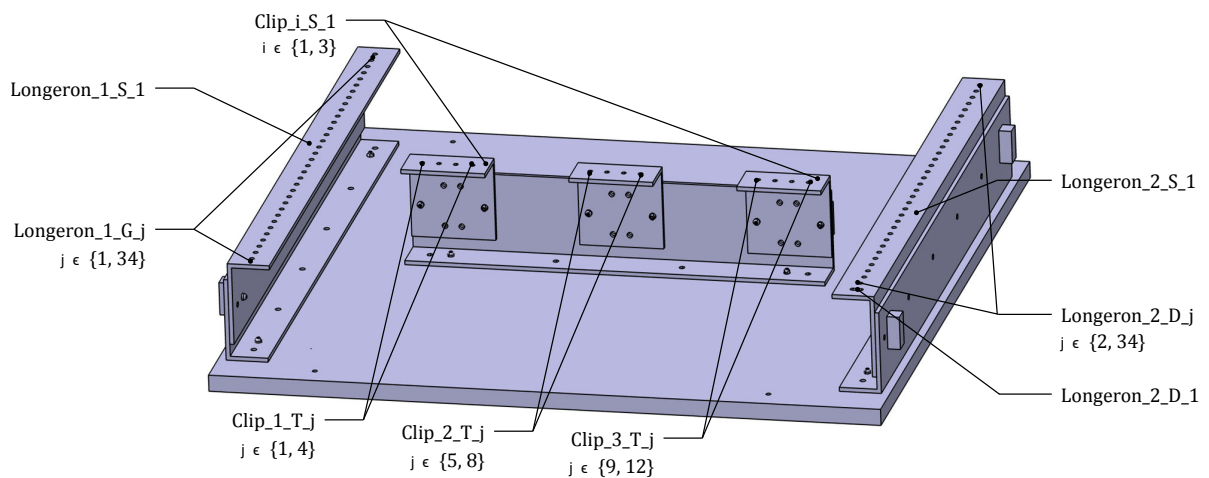


Figure 5.9 – Détail des éléments géométriques de l'*ensemble support*.

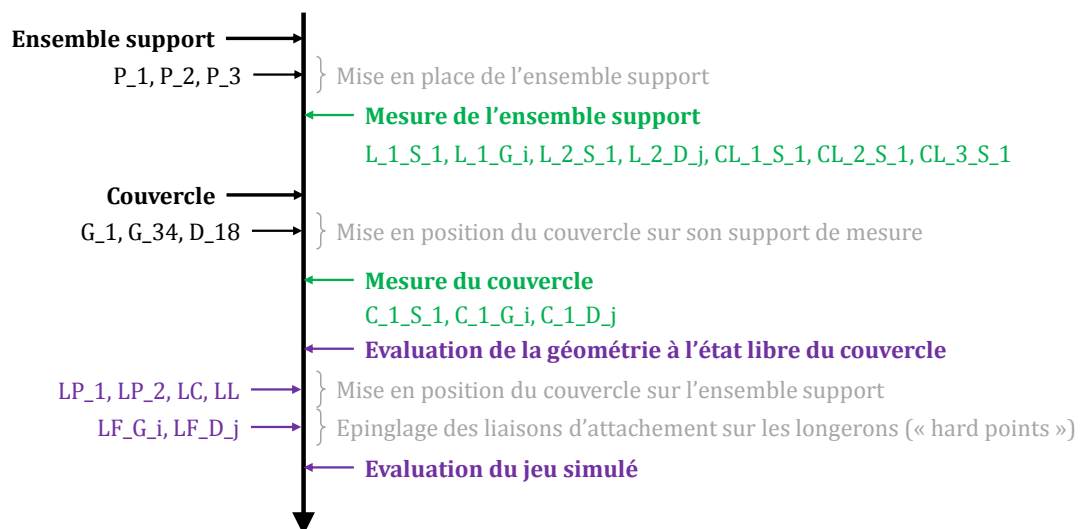


Figure 5.10 – Séquence d'assemblage intégrant les différentes opérations de mesure et de simulation (phases n°1 et n°2).

3 Evaluation de caractéristiques géométriques

Cette section fait notamment l'objet de la mise en application de la méthode décrite dans le *Chapitre 3* au niveau du *couvercle*, et de sa validation expérimentale. Il s'agit en effet d'évaluer la géométrie des composants afin de pouvoir réaliser la simulation de l'assemblage de ces composants. Les étapes de mesure et de simulation sont intégrées à la séquence présentée précédemment, et sont visibles sur la *Figure 5.10*. Les éléments en *vert* représentent les opérations de mesure, les éléments en *violet* représentent les opérations de simulation.

La première étape consiste donc à évaluer la géométrie de l'*ensemble support*, considéré comme rigide, et du *couvercle*, qui lui est flexible. L'évaluation de la géométrie du couvercle, qui correspond aux opérations *Mesure du couvercle* et *Evaluation de la géométrie à l'état libre du couvercle*, est le sujet principal de cette section. Il s'agit de montrer qu'il est possible d'évaluer la géométrie de ce composant quelle que soit sa configuration de mesure, sous réserve de se placer dans un cadre de mise en œuvre défini, et en prenant garde quant à la modélisation du réel.

L'étape suivante est alors, à partir des mesures réalisées, de simuler l'assemblage de ces mesures et d'évaluer virtuellement le jeu entre les composants.

3.1 Description de la mise en œuvre

La mise en œuvre de la méthode de filtrage des données de mesure a fait l'objet de la *Section 4* du *Chapitre 3*. Elle ne sera pas détaillée à nouveau, seuls les configurations de mesure et les résultats obtenus seront exposés.

La mesure de l'*ensemble support* est réalisée en premier. Elle ne pose pas de problème particulier puisque le support est considéré comme rigide. Il s'agit alors de numériser les cinq éléments géométriques (L_1S_1 , L_2S_1 , Cl_1S_1 , Cl_2S_1 , Cl_3S_1) qui interviennent dans la liaison avec le *couvercle*. La position des trous qui permettent le passage des éléments de fixation est évaluée à partir du scan réalisé sur les cinq interfaces. Ceci engendre des incertitudes plus importantes que si les trous avaient été palpés. Cependant sur un composant flexible dont le maintien en position n'est pas assuré, il ne sera pas envisageable de procéder à une acquisition de points avec un palpeur à contact.

La mesure du *couvercle* est ensuite réalisée. Il est nécessaire de commencer par définir la configuration de mesure, car celle-ci aura un impact sur la *géométrie de la forme réelle contrainte* qui sera mesurée. Une configuration isostatique est préférable puisqu'elle va permettre de limiter les incertitudes de positionnement. Ainsi le *couvercle* est mis en position sur trois appuis bombés. De façon à connaître la position de ces appuis par rapport au *couvercle*, le choix a été fait de les placer au niveau des trous de passage des éléments de fixation. De cette manière il sera possible de connaître la position d'un appui par rapport à la géométrie du *couvercle* sans avoir à réaliser une acquisition du support. Ce choix conduit à reconsidérer la géométrie du support. De façon à conserver une mise en position isostatique il est alors nécessaire de laisser les appuis libres dans le plan (appuis posés sur le marbre).

L'une des configurations de mesure choisies est visible sur la *Figure 5.11*. Il s'agit d'une configuration de mesure sur trois appuis, situés au niveau des trous C_1G_1 , C_1G_{34} et C_1D_{18} du *couvercle*. Cette configuration est désignée $G_1_{34}D_{18}$. Le *couvercle* est installé de façon à ce que ce soit sa face inférieure (C_1S_1) qui soit numérisée (c'est à dire orientée vers le haut). En effet, c'est celle-ci qui va être en contact avec l'*ensemble support*.

D'une part l'acquisition de la géométrie réelle contrainte est réalisée. Le recalage de ces données de mesure s'effectue sur les trois points correspondant aux appuis. Il est possible d'évaluer leur position réelle à partir du nuage de points issu de la numérisation du *couvercle*. Le filtrage des données de mesure est ensuite

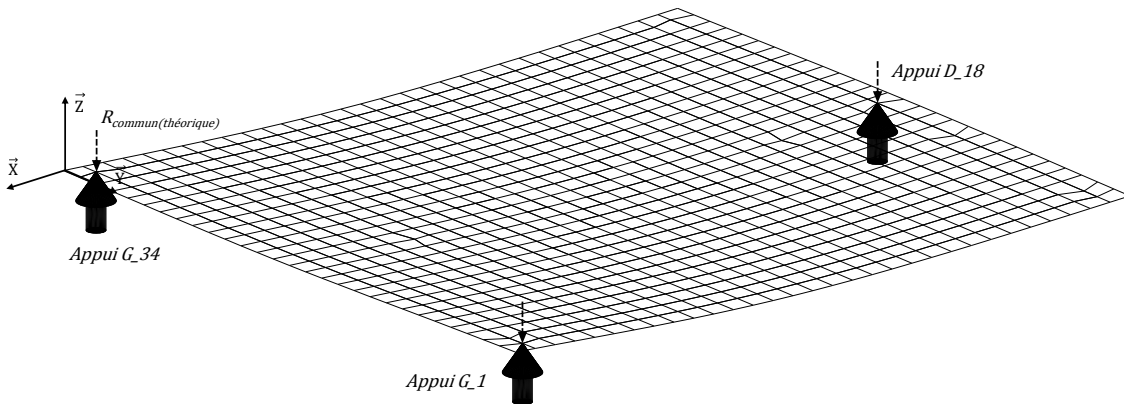
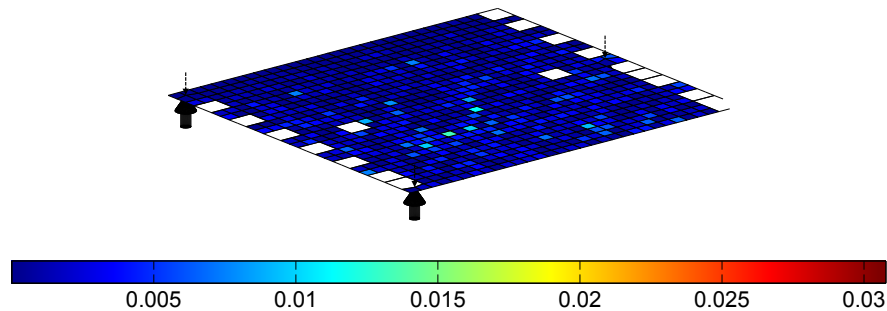
Figure 5.11 – Configuration de mesure $G_1_34_D_18$.

Figure 5.12 – Cartographie du bruit de mesure évalué lors du filtrage (écarts-type en mm).

réalisé, et permet d'évaluer le champ d'écarts partiel représentatif des écarts géométriques entre la *géométrie contrainte mesurée* et la *géométrie théorique discrétisée*. L'analyse modale de ce champ d'écarts partiel permet de définir les modes nécessaires à la reconstruction d'un champ d'écarts complet. Ces différents éléments sont visibles sur la *Figure 5.13*. La cartographie de bruit correspondante est également visible sur la *Figure 5.12*.

D'autre part la simulation de la déformée due à l'environnement du composant permet d'évaluer, à partir du champ d'écarts complet représentatif de la géométrie contrainte mesurée, la *géométrie à l'état libre du composant*. Le modèle utilisé est celui décrit dans la *Section 2.2.1* précédente. Les paramètres géométriques (épaisseur, position des appuis, ...) et mécaniques (module d'Young, masse volumique, ...) du modèle sont choisis au nominal. La *déformée simulée* est visible sur la *Figure 5.13*, ainsi que la *géométrie à l'état libre évaluée*.

Ce résultat semble à première vue cohérent, mais il est difficile de juger a priori de sa validité. La section suivante va faire l'objet de la validation de ce résultat.

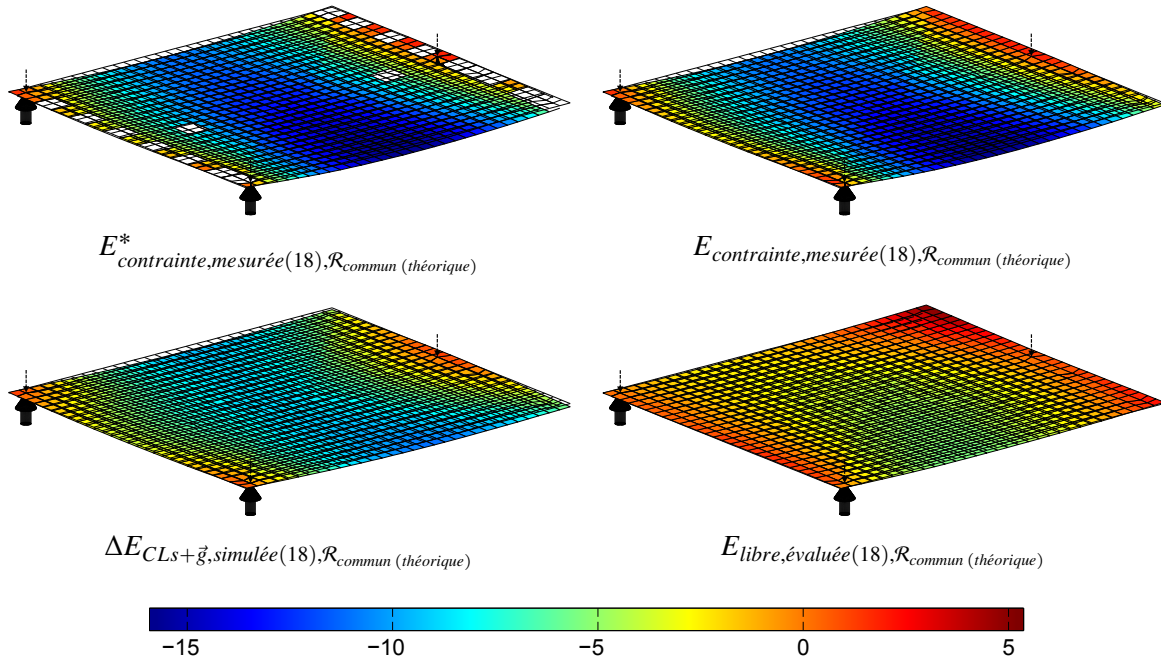


Figure 5.13 – Géométrie partielle et géométrie extrapolée évaluées par la mesure (en haut), déformée simulée et géométrie à l'état libre évaluée (en bas), pour la configuration (18) $G_I_34_D_18$, exprimées dans le repère $\mathcal{R}_{commun} (théorique)$ (écarts en mm, amplitude facteur 1).

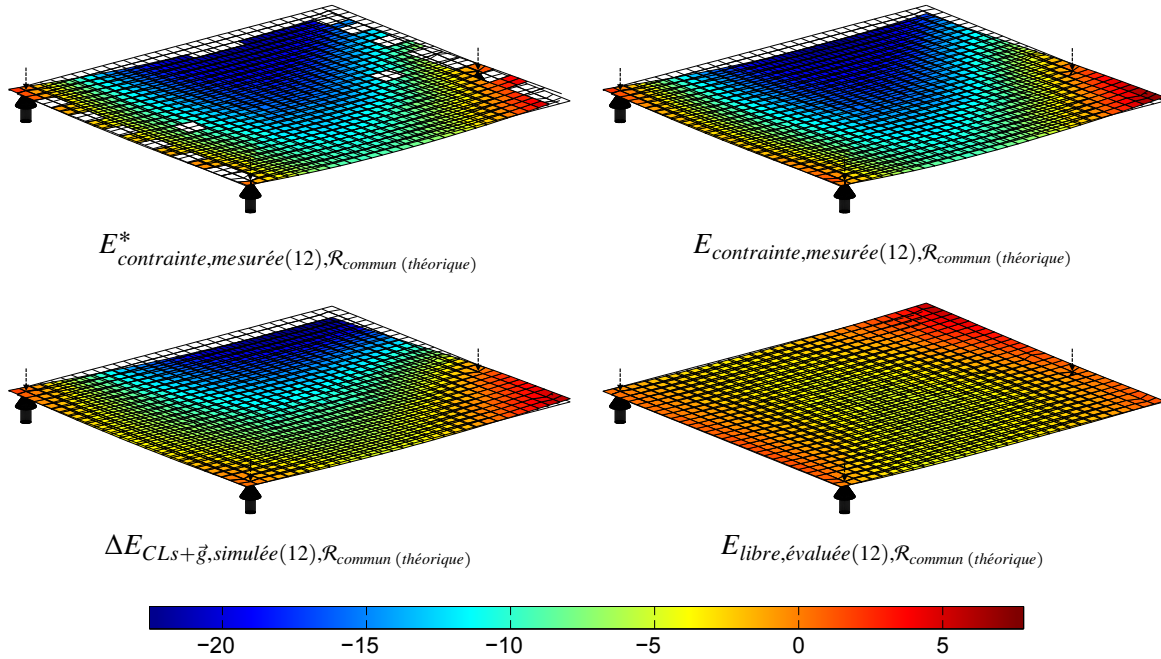


Figure 5.14 – Géométrie partielle et géométrie extrapolée évaluées par la mesure (en haut), déformée simulée et géométrie à l'état libre évaluée (en bas), pour la configuration (12) $G_I_34_D_12$, exprimées dans le repère $\mathcal{R}_{commun} (théorique)$ (écarts en mm, amplitude facteur 1).

3.2 Validation expérimentale de la méthode

L'objectif de cette section est de présenter la validation de la *géométrie à l'état libre évaluée* à l'aide de la méthode mise en place. L'impossibilité d'utiliser un artefact de référence ne permet pas la comparaison de la *géométrie à l'état libre évaluée* à cette référence. Il est donc nécessaire de trouver un autre moyen de valider les résultats obtenus.

3.2.1 Validation par différence de deux géométries à l'état libres évaluées dans deux configurations différentes

(a) Principe de la méthode

Le point de départ est l'Equation 3.9. On peut considérer que, dans le cas où la méthode est déployée dans le cadre qui a été défini, il est possible de remonter à la *géométrie à l'état libre* du composant à partir de différentes configurations de mesure, soit :

$$\begin{cases} E_{contrainte,réelle(1),\mathcal{R}} = E_{libre,réelle(1),\mathcal{R}} + \Delta E_{CLs+\vec{g},réelle(1),\mathcal{R}} \\ E_{contrainte,réelle(2),\mathcal{R}} = E_{libre,réelle(2),\mathcal{R}} + \Delta E_{CLs+\vec{g},réelle(2),\mathcal{R}} \end{cases} \quad (5.1)$$

La *géométrie à l'état libre* étant intrinsèque au composant, on peut affirmer que celle-ci est unique et ne dépend pas de la configuration dans laquelle se trouve le composant :

$$E_{libre,réelle,\mathcal{R}} = E_{libre,réelle(1),\mathcal{R}} = E_{libre,réelle(2),\mathcal{R}} \quad (5.2)$$

Dans ce cas le Système d'équations 5.1 peut s'écrire :

$$\begin{cases} E_{contrainte,réelle(1),\mathcal{R}} = E_{libre,réelle,\mathcal{R}} + \Delta E_{CLs+\vec{g},réelle(1),\mathcal{R}} \\ E_{contrainte,réelle(2),\mathcal{R}} = E_{libre,réelle,\mathcal{R}} + \Delta E_{CLs+\vec{g},réelle(2),\mathcal{R}} \end{cases} \quad (5.3)$$

Ou encore :

$$\begin{cases} E_{libre,réelle,\mathcal{R}} = E_{contrainte,réelle(1),\mathcal{R}} - \Delta E_{CLs+\vec{g},réelle(1),\mathcal{R}} \\ E_{libre,réelle,\mathcal{R}} = E_{contrainte,réelle(2),\mathcal{R}} - \Delta E_{CLs+\vec{g},réelle(2),\mathcal{R}} \end{cases} \quad (5.4)$$

On en déduit alors par différence l'égalité suivante :

$$E_{contrainte,réelle(1),\mathcal{R}} - \Delta E_{CLs+\vec{g},réelle(1),\mathcal{R}} = E_{contrainte,réelle(2),\mathcal{R}} - \Delta E_{CLs+\vec{g},réelle(2),\mathcal{R}} \quad (5.5)$$

Soit :

$$E_{contrainte,réelle(2),\mathcal{R}} - E_{contrainte,réelle(1),\mathcal{R}} = \Delta E_{CLs+\vec{g},réelle(2),\mathcal{R}} - \Delta E_{CLs+\vec{g},réelle(1),\mathcal{R}} \quad (5.6)$$

Il est alors possible de raisonner en terme de variation de géométrie entre deux configurations, ou entre deux états géométriques, et d'écrire la relation suivante :

$$\Delta E_{contrainte,réelle(2-1),\mathcal{R}} = \Delta E_{CLs+\vec{g},réelle(2-1),\mathcal{R}} \quad (5.7)$$

avec $\Delta E_{contrainte,réelle(2-1),\mathcal{R}}$ la différence des *géométries des formes réelles contraintes*,
et $\Delta E_{CLs+\vec{g},réelle(2-1),\mathcal{R}}$ la différence des *déformées dues aux effets de l'environnement*.

Les géométries étant évaluées par mesure et par simulation, l'objectif va alors être d'essayer de montrer expérimentalement que :

$$\Delta E_{contrainte,mesurée(2-1),\mathcal{R}} = \Delta E_{CLs+\vec{g},simulée(2-1),\mathcal{R}} \quad (5.8)$$

avec $\Delta E_{\text{contrainte,mesurée}(2-1),\mathcal{R}}$ la différence des *géométries des formes réelles contraintes*, évaluées par la mesure,

et $\Delta E_{\text{CLS}+\vec{g},\text{simulée}(2-1),\mathcal{R}}$ la différence des *déformées dues aux effets de l'environnement*, évaluées par la simulation.

(b) Mise en œuvre de la validation expérimentale

Il s'agit donc de définir deux configurations de mesure différentes, et d'évaluer pour chacune la géométrie à l'état libre du composant mesuré dans chacune de ces configurations. Différentes configurations ont été étudiées, à la fois isostatiques et hyperstatiques. Celles qui seront présentées ici sont les suivantes :

- ✦ Configuration $G_1_34_D_18$ (18) : Positionnement du *couvercle* sur trois appuis bombés au niveau des trous $C_1_G_1$, $C_1_G_34$ et $C_1_D_18$. Mesure de la face inférieure $C_1_S_1$ du *couvercle*. Les résultats obtenus à partir de cette configuration sont visibles sur la *Figure 5.13*.
- ✦ Configuration $G_1_34_D_12$ (12) : Positionnement du *couvercle* sur trois appuis bombés au niveau des trous $C_1_G_1$, $C_1_G_34$ et $C_1_D_12$. Mesure de la face inférieure $C_1_S_1$ du *couvercle*. Les résultats obtenus à partir de cette configuration sont visibles sur la *Figure 5.14*.

Conformément à l'*Equation 5.8*, il s'agit d'une part de réaliser la différence entre les deux *géométries contraintes évaluées par la mesure*, et de réaliser la différence entre les deux *déformées dues aux configurations de mesure évaluées par la simulation*. Ces deux différences de géométries sont visibles sur la *Figure 5.15*.

Les deux différences de géométries sont sensiblement les mêmes. Il n'est en effet pas possible visuellement de mettre en évidence une différence entre les deux figures. Les écarts minimaux et maximaux entre les deux différences de géométries sont de l'ordre du millimètre en valeur absolue. Si on observe la répartition spatiale des écarts entre les deux différences de géométries, visible sur la *Figure 5.16*, il est cette fois-ci possible de tirer quelques conclusions.

Tout d'abord cette surface écarts, générée par la différence des deux termes de l'*Equation 5.8*, devrait théoriquement être nulle. Ce n'est pas le cas. L'amplitude des écarts avec la géométrie de référence souligne un écart relatif d'environ 6% de l'amplitude maximale des géométries, valeur qui est relativement faible. Cependant la forme de la surface écarts génère plus d'interrogations. En effet, la différence n'est pas constante. Il est possible d'observer un motif qui semble osciller autour de la zone des appuis positionnés en $C_1_D_12$ et $C_1_D_18$. Difficile toutefois de donner un sens à ce motif à ce stade.

Ainsi la méthode de validation présentée permet de chiffrer les écarts relatifs entre les termes évalués par la mesure et les termes évalués par la simulation. Ces écarts semblent être relativement faibles, cependant il est difficile, avec cette méthode de validation, d'en déduire la cause. Il est impossible en effet de savoir si ces écarts sont imputables à la mesure ou à la simulation.

Il est également possible que cette méthode ne permettent pas de refléter toutes les erreurs commises lors de l'évaluation des deux termes. Par exemple une erreur systématique lors de la mesure ne serait pas identifiable par différence. De même pour la comparaison des déformées simulées, une erreur de modélisation du comportement du composant (paramètres matériau notamment) ne pourrait pas être observée par différence. D'où la nécessité de définir une méthode de validation plus pertinente.

Cette méthode de validation a également été mise en œuvre dans d'autres configurations (nombre différent d'appuis, appuis bilatéraux), et sur les plaques présentées au *Chapitre 3*. Les conclusions tirées sont similaires à celles évoquées dans cette section.

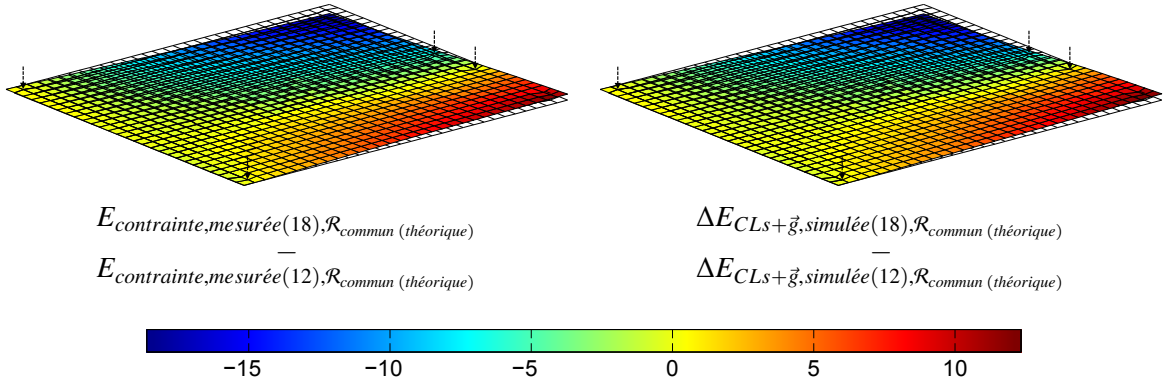


Figure 5.15 – Différence entre les deux *géométries contraintes mesurées* (à gauche) et les deux *déformées simulées* (à droite), exprimées dans le repère $\mathcal{R}_{\text{commun (théorique)}}$ (écarts en mm, amplitude facteur 1).

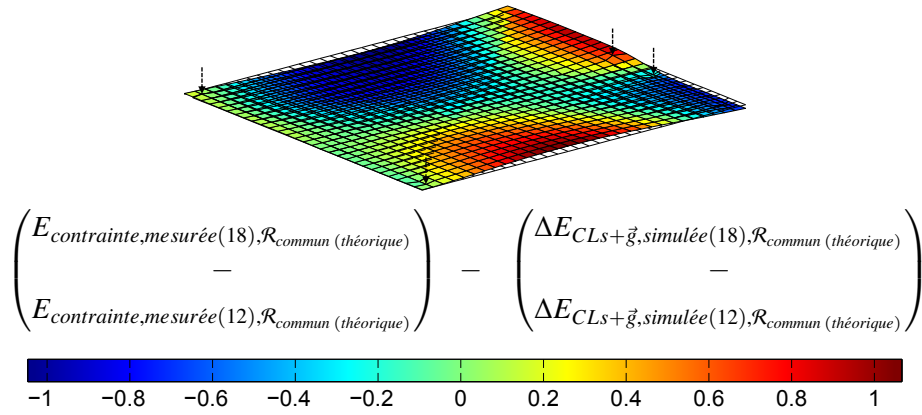


Figure 5.16 – Ecart entre la variation de la *géométrie contrainte mesurée* et la variation de la *déformée simulée* entre les configurations $G_I_34_D_18$ (18) et $G_I_34_D_12$ (12), exprimées dans le repère $\mathcal{R}_{\text{commun (théorique)}}$ (écarts en mm, amplitude facteur 10).

3.2.2 Validation par comparaison à la géométrie à l'état libre obtenue par retournement

(a) Evaluation de la géométrie à l'état libre par retournement

L'analyse des résultats précédents a montré qu'il est difficile d'interpréter le résultat de validation. Il serait intéressant de pouvoir comparer la *géométrie à l'état libre* obtenue par mesure et par compensation des effets de l'environnement à une géométrie de référence. Ne possédant pas d'artefact souple dont la géométrie réelle à l'état libre est certifiée, il est possible d'utiliser une méthode détournée pour obtenir une bonne approximation de cette géométrie.

Le principe est le suivant : il est possible d'évaluer la *géométrie à l'état libre* d'un composant souple en réalisant une évaluation par retournement. Plus exactement deux mesures sont réalisées, de part et d'autre du composant, et par différence il est possible d'obtenir une représentation de la *géométrie à l'état libre* du composant.

En effet, à partir du *Système d'équations 5.1*, on peut développer les termes liés à la *déformée due à la configuration de mesure* et écrire :

$$\begin{cases} E_{\text{contrainte,réelle}}(1), \mathcal{R} = E_{\text{libre,réelle}}, \mathcal{R} + \Delta E_{CLs,\text{réelle}}(1), \mathcal{R} + \Delta E_{\vec{g},\text{réelle}}(1), \mathcal{R} \\ E_{\text{contrainte,réelle}}(2), \mathcal{R} = E_{\text{libre,réelle}}, \mathcal{R} + \Delta E_{CLs,\text{réelle}}(2), \mathcal{R} + \Delta E_{\vec{g},\text{réelle}}(2), \mathcal{R} \end{cases} \quad (5.9)$$

En procédant cette fois-ci par addition des deux équations du système, on obtient la relation suivante :

$$\begin{aligned} E_{\text{contrainte,réelle}(1),\mathcal{R}} + E_{\text{contrainte,réelle}(2),\mathcal{R}} \\ = \\ 2E_{\text{libre,réelle},\mathcal{R}} + \Delta E_{CLs,\text{réelle}(1),\mathcal{R}} + \Delta E_{CLs,\text{réelle}(2),\mathcal{R}} + \Delta E_{\vec{g},\text{réelle}(1),\mathcal{R}} + \Delta E_{\vec{g},\text{réelle}(2),\mathcal{R}} \end{aligned} \quad (5.10)$$

En raisonnant en terme de variation de géométrie, il est possible d'écrire la relation précédente sous la forme suivante :

$$E_{\text{contrainte,réelle}(1),\mathcal{R}} + E_{\text{contrainte,réelle}(2),\mathcal{R}} = 2E_{\text{libre,réelle},\mathcal{R}} + \Delta E_{CLs,\text{réelle}(1+2),\mathcal{R}} + \Delta E_{\vec{g},\text{réelle}(1+2),\mathcal{R}} \quad (5.11)$$

Si les configurations de mesure sont choisies de manière pertinente, il est possible d'annuler les termes $\Delta E_{CLs,\text{réelle}(1+2)}$ et $\Delta E_{\vec{g},\text{réelle}(1+2)}$. En effet, si le retournement se fait à 180° , les effets de la gravité s'annulent. Si le chargement est symétrique, les effets des appuis s'annulent également. Il reste alors :

$$E_{\text{contrainte,réelle}(1),\mathcal{R}} + E_{\text{contrainte,réelle}(2),\mathcal{R}} = 2E_{\text{libre,réelle},\mathcal{R}} \quad (5.12)$$

La *géométrie à l'état libre* est alors :

$$E_{\text{libre,réelle},\mathcal{R}} = \frac{E_{\text{contrainte,réelle}(1),\mathcal{R}} + E_{\text{contrainte,réelle}(2),\mathcal{R}}}{2} \quad (5.13)$$

Les deux *géométries contraintes* étant évaluées par la mesure, l'objectif va être de déterminer expérimentalement :

$$E_{\text{libre,mesurée},\mathcal{R}} = \frac{E_{\text{contrainte,mesurée}(1),\mathcal{R}} + E_{\text{contrainte,mesurée}(2),\mathcal{R}}}{2} \quad (5.14)$$

Les *géométries contraintes* sont alors évaluées par la mesure, et permettent d'obtenir une représentation de la *géométrie à l'état libre*. Cette méthode repose toutefois sur de nombreuses hypothèses, afin de garantir le résultat d'évaluation de la *géométrie à l'état libre* :

- ✦ La géométrie globale du composant doit se prêter à ce type d'évaluation. Il est nécessaire que le composant possède deux *faces* mesurables, et que celles-ci permettent un positionnement des appuis garantissant la symétrie du chargement. L'idéal serait de pouvoir retourner entièrement le support, afin de ne pas introduire d'erreurs de remise en position, mais ceci supposerait un maintien en position du composant sur son support de mesure.
- ✦ Une hypothèse très importante concerne l'épaisseur du composant (c'est-à-dire l'ensemble des distances entre les deux faces mesurées). Il est nécessaire que celle-ci soit connue. De façon à simplifier le traitement, il est judicieux de choisir un composant dont l'épaisseur est théoriquement constante. Dans le cas d'une plaque métallique obtenue par corroyage, cette hypothèse d'épaisseur constante semble réaliste. Ce ne sera pas le cas des matériaux composites.
- ✦ Pour annuler les effets de la gravité, il est nécessaire que le retournement se fasse à 180° .
- ✦ Pour annuler les effets du support, il est nécessaire que durant ce retournement, les conditions aux limites restent les mêmes.
- ✦ La qualité de la mesure va conditionner le résultat. Il est nécessaire de limiter les incertitudes liées à l'évaluation des deux *géométries contraintes* par la mesure.

La *Figure 5.17* illustre le principe de retournement. Les colonnes de gauche et de droite représentent la même géométrie, dans deux environnements qui présentent une gravité opposée. Les conditions aux limites restent identiques d'un environnement à l'autre. On observe ainsi que les deux déformées sont opposées, et s'annulent lorsqu'on les somme. Ainsi la demi-somme des deux *géométries contraintes* permet d'obtenir la *géométrie à l'état libre*. Afin d'illustrer les propos, la *géométrie à l'état libre* est exprimée dans le repère

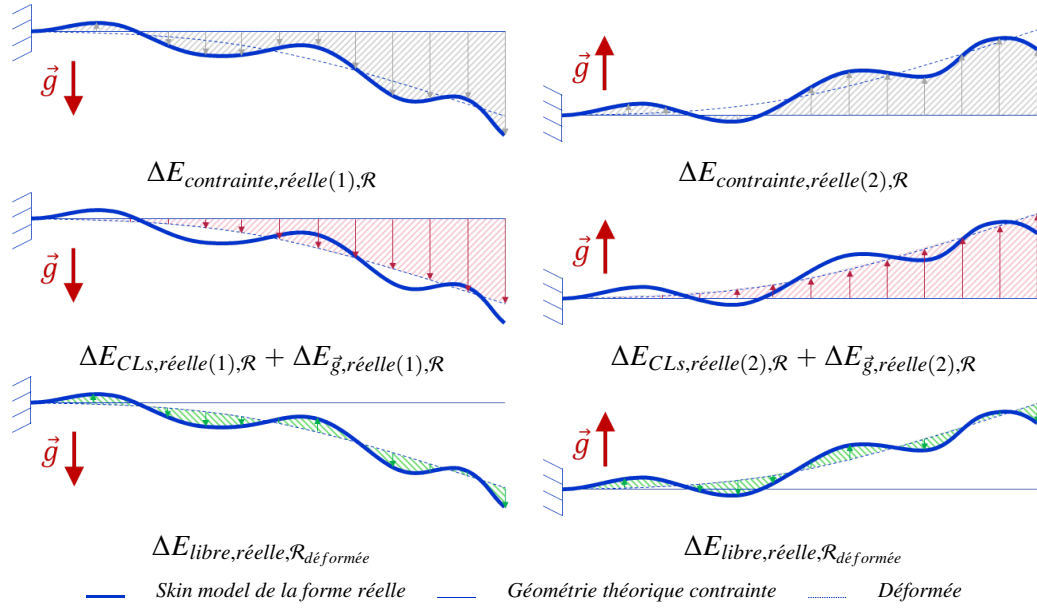


Figure 5.17 – Champs d'écarts impliqués dans une évaluation de la géométrie à l'état libre par retournement.

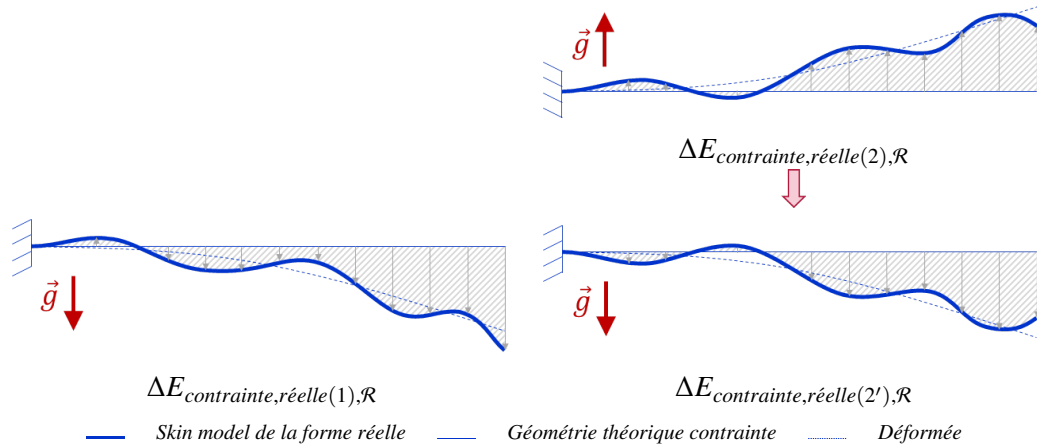


Figure 5.18 – Approximation réalisée pour l'évaluation de la géométrie à l'état libre par retournement.

attaché à la déformée et non à la géométrie théorique. Sous l'hypothèse de petite déformée cela revient au même.

Dans la pratique il n'est pas possible d'inverser la gravité. C'est ainsi le composant qui doit être retourné. La Figure 5.18 illustre ceci. Dans l'idéal le système de mise en position doit être retourné également afin de garantir la symétrie du chargement. Dans la pratique, lorsque le composant n'est pas maintenu sur son support, cela n'est pas possible. Il est alors nécessaire de retourner uniquement le composant. Le support reste alors fixe dans le repère du moyen de mesure, mais il doit s'adapter à la nouvelle configuration de la pièce afin de garantir la symétrie du chargement. Cette contrainte est illustrée sur la Figure 5.19. On supposera que dans le cas présent, puisque les appuis sont placés au niveau des trous, la symétrie du chargement est assurée. La configuration n°2' est alors considérée comme une approximation de la configuration n°2, elle même symétrique de la configuration n°1.

La face mesurée dans la configuration n°1 n'est cependant pas forcément accessible dans les configurations n°2 et n°2'. En effet, le porteur utilisé ne permet pas forcément de mesurer l'envers du composant. Dans ce cas il s'agira de mesurer la seule face accessible. Il sera nécessaire de supposer l'épaisseur du composant constante.

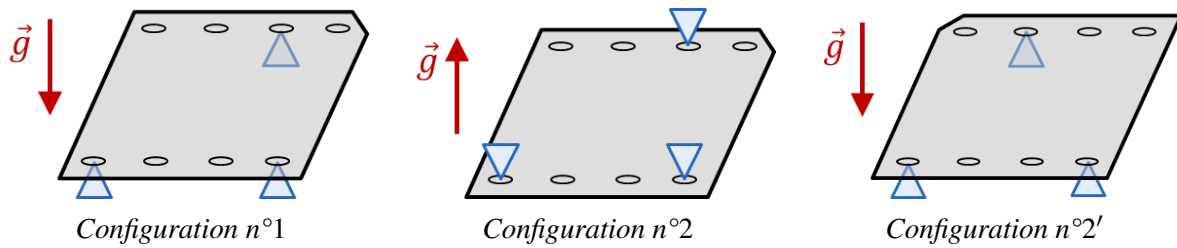
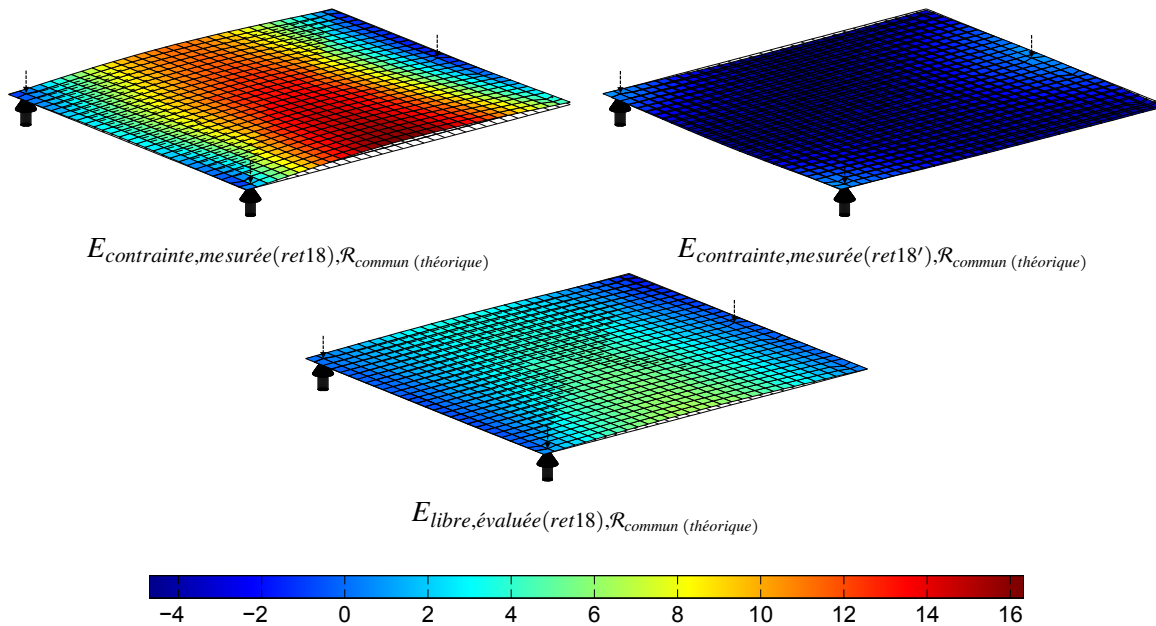


Figure 5.19 – Illustration du principe de retournement sur une plaque.

Figure 5.20 – Géométries contraintes mesurées (faces inférieures et supérieures en haut), et géométrie à l'état libre obtenue par la demi-somme (en bas), pour le retournement (*ret18*) (écarts en mm, amplitude facteur 1).

La demi-somme des deux géométries contraintes (1 et 2') ne peut se faire que lorsque les géométries sont recalées dans le même repère. Les deux repères construits sur les éléments de mesure permettent de recaler les deux géométries contraintes mesurées dans le repère théorique.

(b) Mise en œuvre de la validation expérimentale

L'évaluation de la géométrie à l'état libre par retournement est illustrée à partir de la configuration *G_1_34_D_18* (18) détaillée précédemment. L'acquisition des deux géométries contraintes est réalisée successivement, et permet après traitement d'obtenir deux champs d'écarts représentatifs de ces géométries. Celles-ci sont visibles sur la Figure 5.20. Les formes et les amplitudes de ces deux géométries sont différentes, ce qui laisse penser que la géométrie à l'état libre présente un défaut géométrique intrinsèque relativement important.

La composition de ces géométries permet alors d'obtenir une représentation de la géométrie à l'état libre, visible sur la Figure 5.20. Cette représentation, évaluée seulement par la mesure, peut servir de référence. En effet, les différentes expérimentations réalisées au cours de ces travaux de thèse ont montré qu'il est plus difficile de maîtriser les incertitudes liés à l'évaluation de la déformée due à l'environnement par la simulation. Cela vient principalement du fait que la modélisation nécessite la connaissance de nombreux paramètres, et qu'il n'est pas toujours évident de les identifier.

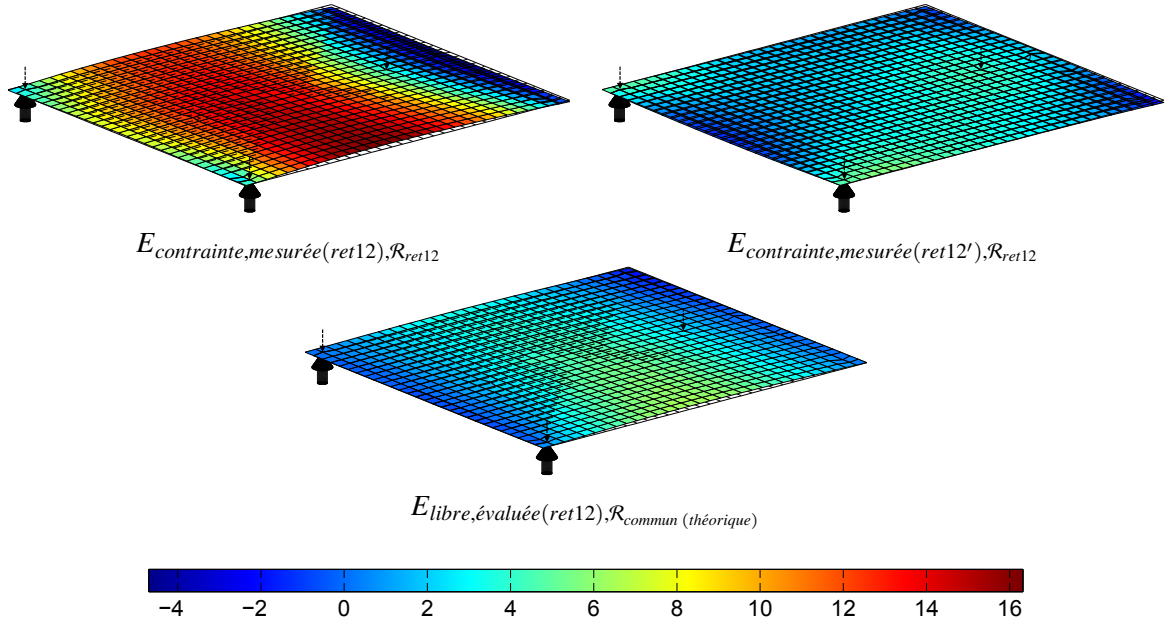


Figure 5.21 – *Géométries contraintes* mesurées (faces inférieures et supérieures en haut), et *géométrie à l'état libre* obtenue par la demi-somme (en bas), pour le retournement (*ret12*) (écarts en mm, amplitude facteur 1).

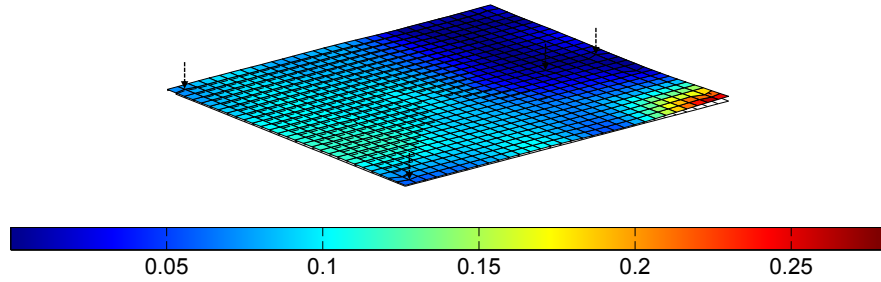


Figure 5.22 – Variation observée entre les deux *géométries à l'état libre* évaluées par retournement (écarts en mm, amplitude facteur 100).

Cette géométrie évaluée par retournement ayant pour but de servir de référence, il est nécessaire de qualifier le résultat obtenu. Pour cela un second retournement a été effectué, afin d'étudier la variation résultante sur la *géométrie à l'état libre* évaluée. Les deux retournements étudiés sont ainsi les suivants :

- Configuration $G_{I_34_D_18}$ (*ret18*).
- Configuration $G_{I_34_C_12}$ (*ret12*).

La même procédure est réalisée pour l'acquisition des géométries. A chaque fois il s'agit de mesurer les deux faces, et de réaliser le traitement afin d'obtenir un champ d'écarts complet représentatif de la *géométrie à l'état libre* évalué uniquement par la mesure. La nouvelle *géométrie à l'état libre* obtenue par retournement est visible sur la Figure 5.21. On observe une forte corrélation entre les deux géométries évaluées par des retournements différents.

Si on s'intéresse aux variations entre les deux *géométries à l'état libre* évaluées par retournement, visibles sur la Figure 5.22, on s'aperçoit que les variations restent limitées. Elles sont globalement de l'ordre de $0.1mm$ sur une grande partie du composant. On observe également un pic à $0.3mm$ environ au niveau d'un des coins du *couvercle*, mais celui-ci est inexpliqué à l'heure actuelle. Les sources d'erreur sont prin-

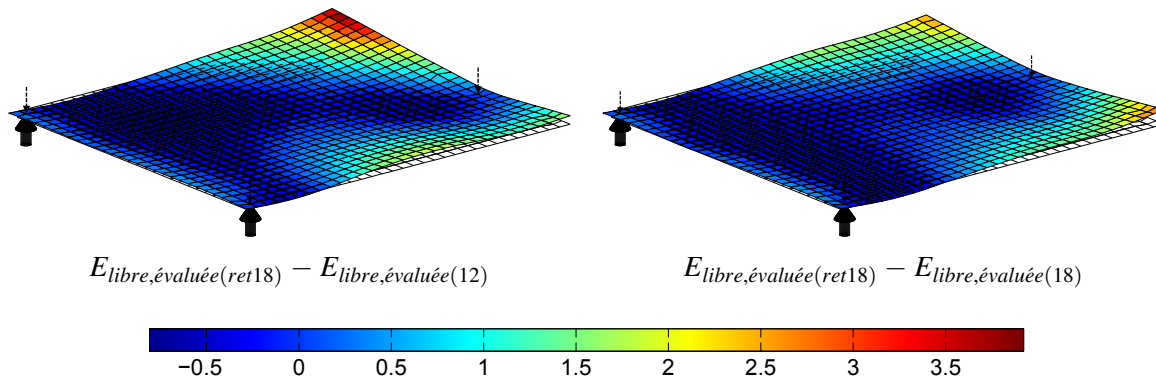


Figure 5.23 – Ecart évalué, pour les configurations $G_{I_{34}D_{12}}$ (12) et $G_{I_{34}D_{18}}$ (18), entre la géométrie à l'état libre obtenue par retournement et la géométrie à l'état libre obtenue par mesure et par compensation des effets de l'environnement à l'aide de la simulation de référence (écarts en mm, amplitude facteur 10).

ciement liées au positionnement des appuis sur l'autre face (et non à l'envers sur la même face), et au recalage des deux géométries contraintes mesurées dans un même repère pour réaliser la composition.

Il est ainsi possible de conclure, dans le contexte de ces travaux, quant à la pertinence de ce choix pour définir une géométrie à l'état libre de référence, évaluée par retournement. Cette méthode permet de ne pas utiliser la simulation numérique, source majeure d'incertitudes, pour obtenir une géométrie de référence. Le fait de n'utiliser que la mesure permet de limiter les incertitudes relatives au résultat d'évaluation. Les variations observées entre les géométries à l'état libre évaluées à partir de deux configurations de retournement différentes sont suffisamment faibles pour justifier le choix de cette méthode pour définir une géométrie de référence.

Cette géométrie de référence est alors utile à la validation du résultat obtenu par la mesure et la compensation des effets de l'environnement sur la géométrie du composant. Elle est en effet plus pratique pour comparer les résultats obtenus, que ce soit en comparant la géométrie à l'état libre évaluée à cette géométrie de référence, ou en comparant la différence d'une géométrie contrainte et de cette géométrie de référence (c'est-à-dire une déformée réelle constatée) à une déformée simulée.

Elle peut également servir de référence pour valider le choix des paramètres du modèle mécanique, afin d'améliorer les résultats d'évaluation. Il est en effet possible d'analyser les écarts entre cette géométrie et la géométrie à l'état libre évaluée par mesure et par compensation des effets de l'environnement. Les géométries sont au préalable recalées dans le repère commun théorique. Les écarts entre ces géométries sont visibles sur la Figure 5.23.

Ces écarts sont dus d'une part à la mesure, et d'autre part à la simulation. Difficile toutefois d'en déduire les causes exactes à partir des différences de géométries constatées. Ainsi une analyse de sensibilité est réalisée afin d'évaluer l'impact des différents paramètres de la méthode mise en œuvre sur la géométrie à l'état libre évaluée, et donc sur ces écarts constatés. Ceci fait l'objet de la section suivante.

4 Analyse de sensibilité

Sur le principe, la méthode d'évaluation de caractéristiques sur des composants souples a pour objectif l'obtention de la géométrie à l'état libre du composant à partir d'une mesure de cette géométrie contrainte dans une configuration connue. Cette méthode nécessite cependant une évaluation de la géométrie de la forme réelle contrainte par la mesure et de la déformée due à l'environnement qui contraint le composant

par la simulation. La validité du résultat dépend donc fortement des incertitudes liées à l'évaluation de ces deux termes.

D'une part le processus de mesure et de traitement va entacher la représentation de la *géométrie de la forme réelle contrainte* d'une certaine incertitude. La maîtrise du système de mesure ainsi que son utilisation dans le cadre d'un protocole clairement défini permet cependant de limiter celle-ci. En ce qui concerne le traitement des données de mesure il sera nécessaire de s'assurer de la robustesse des algorithmes.

D'autre part le processus de simulation va également entacher la représentation de la *déformée* d'une erreur. Afin de limiter celle-ci, il s'agira de modéliser correctement l'environnement qui contraint le composant lors de sa mesure. Le modèle utilisé comporte un grand nombre de paramètres, et la difficulté réside dans le choix de la valeur de ces paramètres, qui doivent être représentatifs de la réalité afin de garantir un résultat fidèle au réel.

Cette section fait l'objet d'une analyse de la sensibilité de la méthode mise en œuvre à la variation de certains paramètres jugés les plus influents, et vise à délimiter un cadre à la mise en œuvre de cette méthode.

4.1 Sélection des paramètres influents

L'état de l'art réalisé au *Chapitre 3* a permis de constituer deux diagrammes de causes et effets, disponibles en *Annexe A*. Le premier, visible sur la *Figure A.1*, concerne les causes d'incertitudes liées à l'acquisition de la géométrie d'un composant souple à l'aide d'un système de mesure sans contact *LASER* plan. Le second, visible sur la *Figure A.2*, concerne les causes d'incertitudes liées à la modélisation du réel, au traitement des données de mesure et à la simulation numérique.

Ces diagrammes non-exhaustifs recensent cependant beaucoup trop de paramètres pour envisager une étude complète de chacun d'entre eux. Pour cela il est nécessaire de réaliser une sélection des paramètres qui sont jugés les plus influents sur la variabilité du résultat obtenu. Cette sélection se base à la fois sur l'état de l'art réalisé et les constats des différents auteurs, ainsi que sur l'expérience acquise au cours des différentes expérimentations réalisées pendant ces travaux de thèse. Il est alors possible de limiter les diagrammes aux paramètres jugés les plus influents sur la variabilité du résultat. Les diagrammes visibles en *Annexe A* sur la *Figure A.3* listent ainsi ces paramètres influents.

Certains paramètres concernant l'environnement réel et l'acquisition semblent, dans le contexte de ces travaux, avoir un impact direct sur la qualité du résultat final. L'influence des éléments suivants est ainsi étudiée :

- ✦ Le système de mesure (caractérisé notamment par un bruit et une justesse de mesure).
- ✦ La mise en position de la pièce (caractérisée notamment par une configuration particulière).
- ✦ La déformée du composant (caractérisée notamment par une forme et une amplitude).
- ✦ L'environnement (caractérisé notamment par la gravité et la température).

Il est également possible, pour une mise en position donnée sans modification de l'environnement, de parler de répétabilité de mesure. Celle-ci permettra en effet de caractériser le résultat de mesure obtenu dans des conditions identiques (ou du moins très proches). Pour plusieurs mises en position dans une même configuration à des instants différents dans le temps, on parlera de reproductibilité. Celle-ci permettra de caractériser le résultat de mesure obtenu dans des conditions variables.

D'autres paramètres concernant le traitement des données de mesure et la simulation semblent également avoir un impact fort sur le résultat obtenu. Il s'agit des éléments suivants :

- ✦ Le recalage rigide des données de mesure (caractérisé notamment par l'incertitude sur la position réelle des appuis par rapport à leur position théorique).
- ✦ La zone de recherche des points voisins (caractérisée notamment par sa forme et ses dimensions).

- L'extrapolation modale dans les zones vides d'informations de mesure (caractérisées notamment par leurs tailles, leurs positions et leurs localisations).
- Les paramètres géométriques du modèle, liés à la simplification, à l'idéalisation et à la discrétisation (caractérisés notamment par le modèle *Eléments Finis* choisi et éventuellement l'épaisseur associée).
- Les paramètres matériau du modèle (notamment le *module d'Young* et la *masse volumique*).
- La modélisation des conditions aux limites (caractérisée notamment par la position des appuis, leur nature et les efforts mis en jeu).

Les trois premiers items concernent le traitement des données de mesure, et leur variabilité influe sur la variation du champ d'écart représentatif de la *géométrie contrainte* évaluée par la mesure. Les trois items suivants concernent plus particulièrement le domaine de la simulation. Leur variabilité influe sur la variation du champ d'écart correspondant à la *déformée simulée* représentative des effets de l'environnement sur le composant dans sa configuration de mesure. Ces deux aspects seront traités séparément par la suite.

4.2 Sensibilité au niveau de l'acquisition et du traitement

4.2.1 Données concernant le système d'acquisition

Les travaux de thèse de [Audfray, 2012] ont permis de qualifier le système de mesure utilisé pour l'acquisition de la *géométrie de la forme réelle contrainte*. L'ensemble composé de la *MMT* et du capteur *LASER* plan a ainsi été caractérisé par des indicateurs qui sont un bruit de mesure de $0.009mm$ et une justesse de mesure de $0.01mm$. Les résultats liés à cette qualification du système de mesure sont consignés en *Annexe D*.

Ces valeurs ont été obtenues dans des conditions spécifiques de mesure, garantissant notamment une distance de numérisation ainsi qu'une inclinaison du capteur optimales (distance de numérisation comprise entre $140mm$ et $160mm$, inclinaison du capteur inférieure à 20°). Ces préconisations ont été autant que possible respectées lors de l'acquisition de la *géométrie contrainte*. Cependant la qualification du système de mesure a été réalisée sur des étalons matifiés, permettant de réduire considérablement le bruit de numérisation (d'un facteur 2 ou 3 par rapport à une surface métallique non traitée). Les expérimentations étant dans ces travaux réalisées sur des composants classiques, il est logique que les valeurs estimées soient plus importantes, notamment au niveau du bruit de mesure.

Dans les faits la plage commune de distances de numérisation qui permet à la fois la qualification du bruit et de la justesse est relativement faible ($5mm$). Dans le cas présent les *géométries contraintes* pouvant atteindre des amplitudes de plusieurs dizaines de millimètres (défaut de forme plus déformée exprimés par rapport à la géométrie théorique), il est difficile de garantir le respect de cette plage commune. Toutefois il est possible d'augmenter cette plage de distances de numérisation sans dégrader la justesse relative du capteur. Cela engendre potentiellement une hausse du bruit de numérisation, théoriquement de $0.009mm$ à $0.015mm$. Ce bruit de numérisation n'est pas forcément gênant puisqu'un filtrage est réalisé par la suite.

4.2.2 Répétabilité de génération d'un champ d'écarts

La première étape consiste à observer la répétabilité de génération d'un champ d'écarts représentatif de la *géométrie de la forme réelle contrainte* évaluée par la mesure, à partir d'acquisitions réalisées dans des conditions similaires.

Dans le cas présent le mesurande observé est ainsi le champ d'écarts généré entre la géométrie théorique et la *géométrie contrainte* mesurée. Il s'agit donc d'un ensemble de distances évaluées entre un point d'un premier ensemble (les noeuds du maillage nominal) et un paquet de points d'un second ensemble (les points

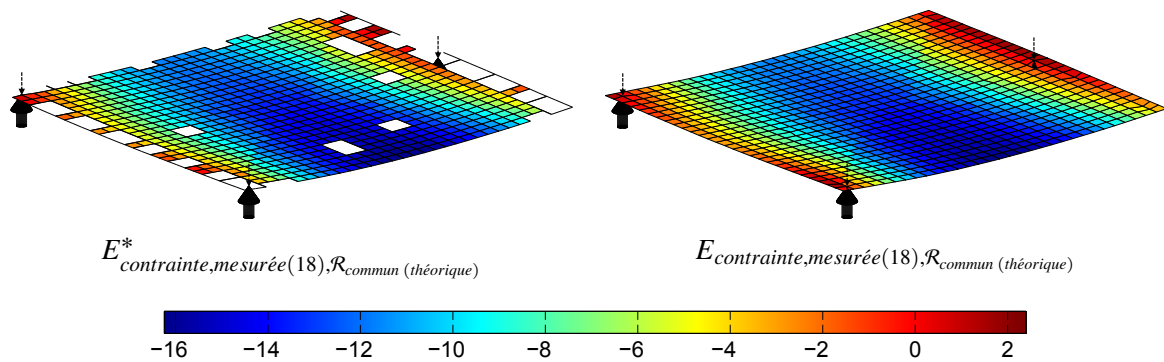


Figure 5.24 – Géométries contraintes mesurées correspondant aux champs d'écarts moyens évalués (partiel et complet).

de mesure), suivant une direction imposée par la normale au nominal. Il est question ici de caractériser la variation des valeurs des distances évaluées en chaque noeud à l'aide de la méthode décrite précédemment.

Le composant étant mis en position dans une configuration particulière définie (dans le cas présent dans la configuration $G_1_34_D_18$ (18)), on réalise une série de mesures sans changer les paramètres d'acquisition (paramètres de numérisation, trajectoire de numérisation, ...). Les valeurs optimales de ces paramètres ont été déterminées au préalable à l'aide d'un plan d'expérience visant à limiter le bruit de mesure. Quinze mesures sont ainsi réalisées dans une cellule climatisée, et on vérifie également que les variations de température et d'hygrométrie restent négligeables. A chaque nuage de points est ensuite associé un champ d'écarts représentatif de la *géométrie contrainte* mesurée, en répétant la même procédure de traitement (recalage rigide identique, paramètres du filtre fixés). La variation de l'amplitude du champ d'écarts généré est alors étudiée, au niveau des points en communs aux quinze champs d'écarts évalués.

Les deux géométries correspondant aux champs d'écarts moyens évalués, partiel et complet, sont visibles sur la Figure 5.24. Ils sont cohérents vis-à-vis du champ d'écarts évalué précédemment et visible sur la Figure 5.13, puisque les géométries sont visuellement les mêmes. Il est également possible d'évaluer à partir des quinze champs d'écarts la dispersion en chaque brin du champ, ainsi que l'écart-type. Ces deux éléments sont visibles sur la Figure 5.25. On observe une nouvelle fois que l'utilisation d'une représentation modale permet de filtrer les champs d'écarts et de réduire le bruit au niveau des bords notamment. L'étendue maximale de la dispersion observée au niveau des quinze champs d'écarts évalués est ainsi de l'ordre de $0.1mm$. La partie centrale du couvercle est soumise à de plus grandes variations, la variation restant inférieure à $0.05mm$ plus près des appuis. En ce qui concerne l'écart-type maximal, il atteint environ $0.03mm$. La répartition est spatialement la même, la valeur étant inférieure à $0.015mm$ près des appuis. Les signatures modales ont été également étudiées (non représentées ici). Elles sont très proches puisque la variation relative la plus importante est de l'ordre de 0.03 (par rapport à la contribution moyenne des modes qui est de 1.32).

Les valeurs de variation sont relativement faibles, ce qui est un point positif. Une étendue de la dispersion de $0.1mm$ représente seulement 0.5% de l'amplitude du champ d'écarts représenté. Cependant la répartition de ces variations par rapport à la géométrie de la pièce contrainte tend à incriminer la géométrie même du composant. Il est donc nécessaire de vérifier que l'hypothèse d'une géométrie constante pour un état géométrique donné est juste.

4.2.3 Effets de la thermique sur le capteur

Une première cause de variation observée peut être due à la distance de numérisation. [Audfray, 2012] préconise, pour le capteur utilisé, une distance de numérisation de $140mm$ à $160mm$ afin de garantir une justesse de $0.01mm$. Cependant :

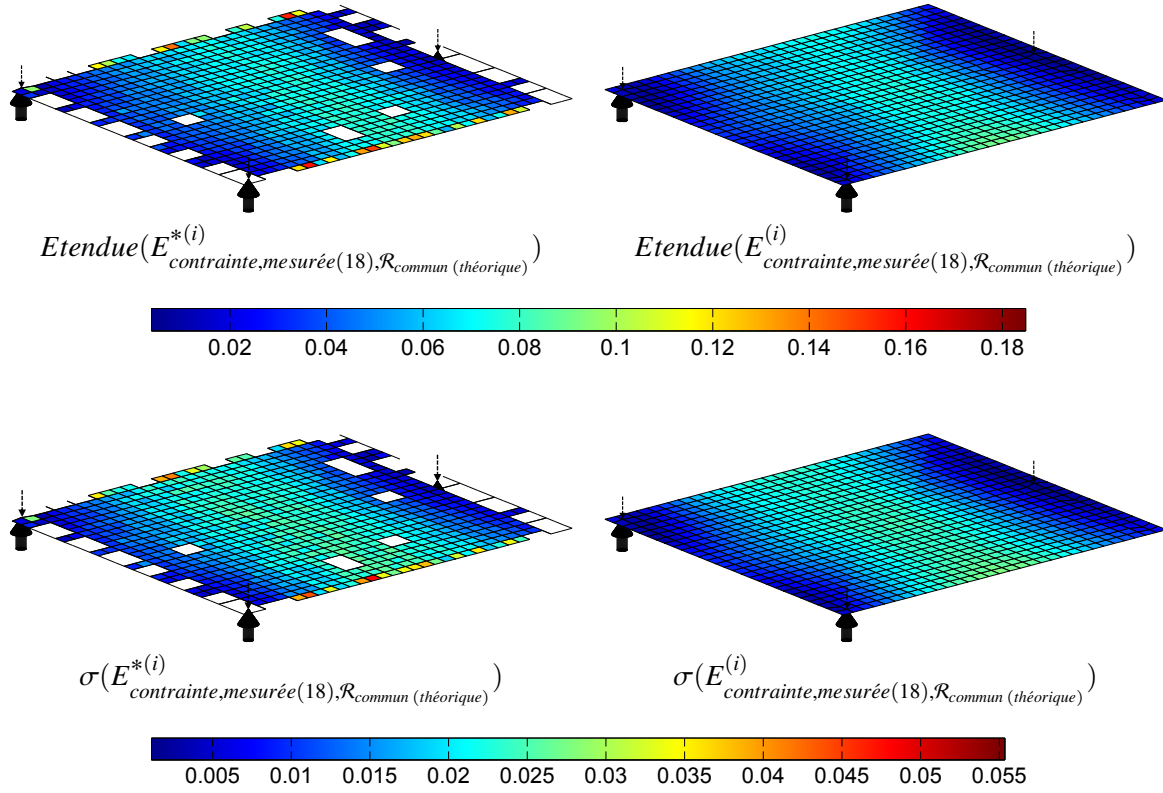


Figure 5.25 – Etendues et écart-types de la dispersion des amplitudes des champs d'écarts (partiels et complets), $i \in \{1; 15\}$.

- La justesse évaluée n'est pas constante sur cet intervalle. Elle varie dans l'intervalle $[0; 0.01]$ (voir la Figure D.1 en Annexe D).
- L'amplitude de la géométrie contrainte mesurée est de l'ordre de grandeur de la taille de la fenêtre d'acquisition préconisée.

Il est ainsi évident que la justesse du système de mesure n'est pas constante sur l'intégralité de la géométrie mesurée. Il en est de même pour le bruit de mesure. De plus les essais de qualification ont été réalisés sur des étalons de dimensions réduites, alors que le couvercle mesuré est de dimension bien plus importante. Cet aspect est également à prendre en compte, même s'il est difficilement exploitable.

Sur la Figure 5.26 est illustrée une vue en coupe, dans la section représentée en rouge, des quinze champs d'écarts évalués. La légende représente l'aspect temporel, c'est à dire que les quinze mesures sont listées dans l'ordre chronologique. La première, qui sert de référence, correspond à la mesure à $t = 0min$. Sont ensuite représentées les variations, par rapport à cette référence, au cours du temps. Il y a un intervalle de temps d'environ $18min$ entre chaque mesure, temps nécessaire à l'acquisition de la géométrie contrainte du couvercle. D'autres sections ont été étudiées, dont quelques unes sont disponibles en Annexe E.

Les courbes mettent en avant une variation de l'ordre de $0.1mm$, ce qui correspond aux premières conclusions. La forme des courbes correspond également. L'aspect temporel permet de noter une évolution de cette variation au cours du temps. Quelle que soit la section étudiée, il semblerait que l'amplitude du champ d'écart évolue dans le même sens.

La partie gauche de la courbe, au niveau de l'abscisse $x = -750mm$, correspond pour la section $y = 375mm$ à la position de l'appui D_{18} . La variation est très faible au niveau de cet appui. Il semblerait donc que la géométrie évolue entre les appuis, ou bien que les conditions de mesure au niveau des appuis soient meilleures.

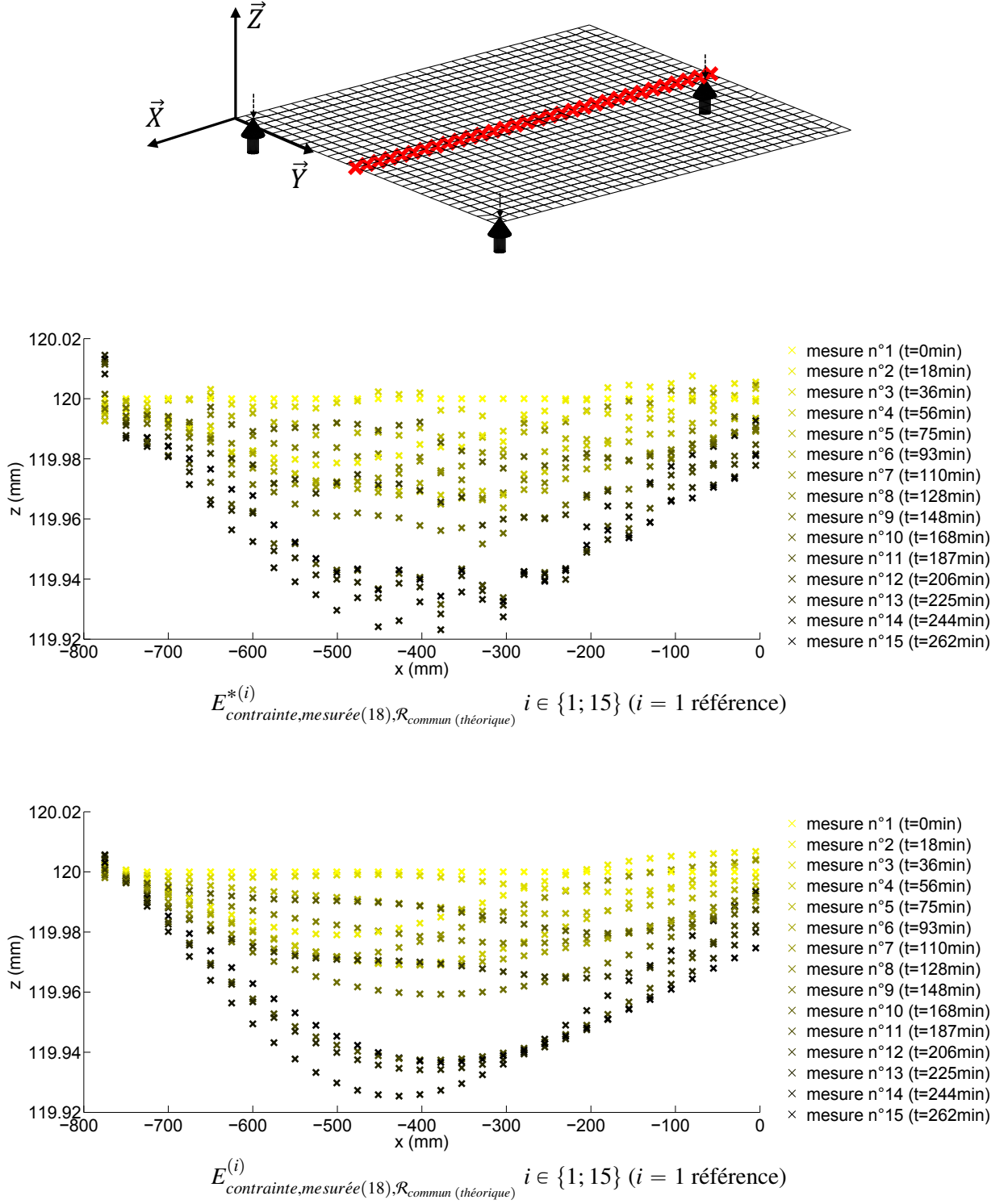


Figure 5.26 – Evolution au cours du temps de la *géométrie contrainte* mesurée correspondant aux champs d'écart évalués (partiels et complets) par rapport à la première évaluation ($i = 1$ référence), dans une section donnée (ici section $y = 375mm$). Il y a environ 18min entre deux mesures consécutives.

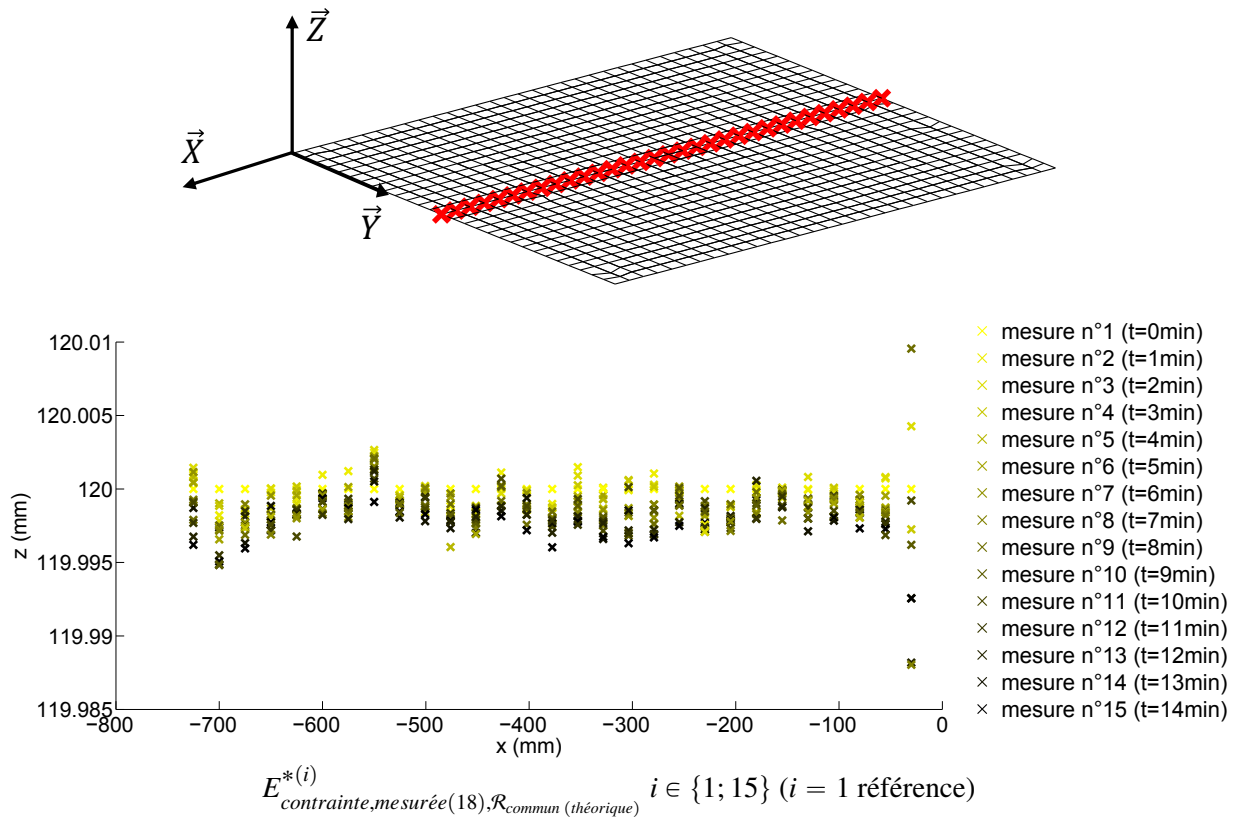


Figure 5.27 – Evolution au cours du temps de la *géométrie contrainte* mesurée correspondant aux champs d'écart partiels évalués, dans une section donnée lorsque la pièce a été bridée (ici section $y = 325mm$). Il y a environ $1min$ entre deux mesures consécutives.

Afin d'exclure certaines suppositions, une nouvelle série de mesure a été réalisée au niveau de la même section, mais cette fois-ci sur le *couvercle* posé à plat sur le marbre, et lesté à l'aide de masses. Cela permet de garantir que la géométrie du composant n'évolue pas au cours de la mesure, et que les conditions de mesure restent les mêmes (altitude de numérisation et orientation du capteur par rapport à la surface numérisée). La Figure 5.27 illustre de nouveau les quinze champs d'écart évalués dans cette section. L'échelle de temps n'est plus la même car cette fois-ci une seule section a été numérisée. Il y a ainsi environ $1min$ entre deux mesures consécutives. On observe une forte diminution de la variation d'amplitude au cours du temps, qui est inférieure à $0.01mm$. La variation est cette fois-ci relativement constante sur toute la section. Il existe une tendance similaire à celle observée précédemment, c'est à dire que les courbes se déplacent vers le bas. L'échelle de temps n'étant pas la même, on suppose toutefois que le phénomène serait accentué avec une échelle de temps similaire.

Cela permet ainsi de mettre en avant un phénomène qui n'est apparemment pas lié à la distance de numérisation, ou au changement de géométrie du composant (fluage ou modification de la configuration réelle des appuis libres).

Afin de quantifier cette variation au cours du temps, un étalon rigide a été mesuré. Il est visible sur la Figure 5.28. Il s'agit de marches matifiées. La procédure de mesure consiste alors à numériser au cours d'une même passe deux marches voisines, décalées théoriquement de $15mm$. Les deux images de la ligne *LASER* observées par la caméra *CCD* du capteur sont également visibles sur la Figure 5.28. Elles sont placées au centre de la matrice, et positionnées de part et d'autre de ce centre.

Plusieurs acquisitions sont réalisées au cours du temps, sur une durée totale de $146min$, chaque acquisition durant environ $5s$. Les acquisitions ne sont pas réalisées à intervalles réguliers, l'intervalle étant de plus en plus large. Entre chaque acquisition, un cycle de chauffe est réalisé, c'est à dire que le capteur exécute

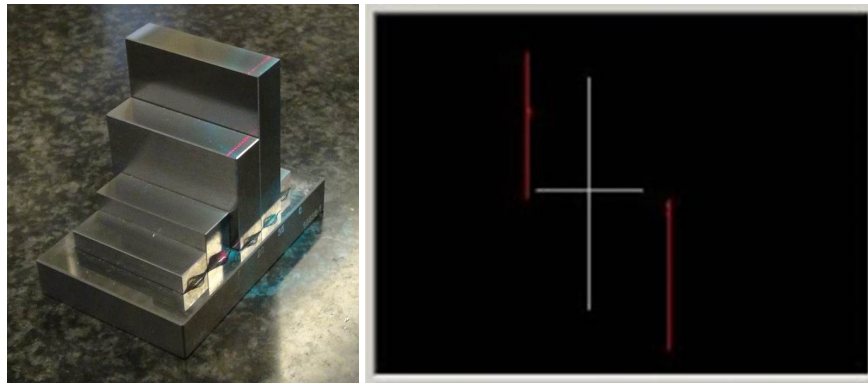


Figure 5.28 – Marches étalons utilisées pour analyser la variation de mesure au cours du temps. Représentation de la ligne *LASER* au niveau de la caméra *CCD* du capteur.

une trajectoire au dessus d'une surface afin que la caméra *CCD* soit toujours en train d'observer la ligne *LASER*.

Le dépouillement des résultats de mesure est réalisé de la façon suivante. Pour chaque marche, le premier nuage de points mesuré sert de référence. D'abord le plan des moindres carrés associé au premier nuage de points détermine l'orientation des plans des moindres carrés associés aux autres nuages de points (tous les plans seront parallèles). Ensuite les variations sont exprimées relativement à ce premier plan des moindres carrés.

Les résultats obtenus sont visibles sur les graphiques présents sur la *Figure 5.29*. Les points représentent les variations observées à partir des mesures réalisées. Les échelles des deux graphiques sont les mêmes. On observe une évolution similaire des variations sur les deux courbes, l'une positive et l'autre négative. L'évolution semble être exponentielle, ce qui laisse penser que la variation est liée à un phénomène thermique.

Afin de vérifier cette supposition, une régression exponentielle du type $A \times (1 - \exp(-t/\tau))$ est réalisée pour chaque lot de données. Il est ainsi possible d'identifier les coefficients de ce modèle à partir des données de mesure. Les coefficients A des deux modèles permettent de tracer les asymptotes horizontales à $0.008mm$ et $-0.0098mm$ visibles sur les graphiques. Ceci indique que la variation est opposée en fonction de la position de la ligne *LASER* dans la caméra *CCD*. Les constantes de temps τ sont évaluées à $39.6min$ et $43.6min$, valeurs qui sont relativement proches. Les variations se stabilisent ainsi autour de $120min$.

Il est ainsi possible de conclure qu'une source non négligeable de variations réside dans l'échauffement du capteur au cours de la mesure. Il semblerait que cette variation soit de l'ordre de $0.01mm$, pour une position donnée dans la matrice *CCD*, entre deux acquisitions réalisées à $120min$ d'intervalle. Cette variation semble également être fonction de la position de la ligne *LASER* dans la matrice *CCD*, puisque les mesures des deux marches mènent à des variations différentes et de signes opposées. Dans ce cas la variation globale pour la *géométrie contrainte* mesurée serait plus importante que celle estimée ici, car les essais ont été réalisés relativement proche du centre de la matrice du capteur.

Dans le cas de mesures réalisées sur une courte durée, la variation reste faible (environ $0.002mm$ pour une durée inférieure à $10min$). Afin de limiter ces variations, il est possible de réaliser un cycle de chauffe du capteur avant l'acquisition. Ce cycle de chauffe est cependant relativement long (de l'ordre de $120min$). Pour l'acquisition de la *géométrie contrainte* du *couvercle*, qui dure environ $18min$, les variations pourraient atteindre $0.004mm$ entre le début et la fin de l'acquisition (dans une même zone de la matrice *CCD*).

Il reste cependant une inconnue qui concerne la calibration interne du capteur *LASER*. Celle-ci a été réalisée à une température donnée. S'il s'agit de la température en sortie de cycle de chauffe, dans ce cas la mise en œuvre de ce cycle permettra de réduire les incertitudes de mesure. S'il s'agit d'une température

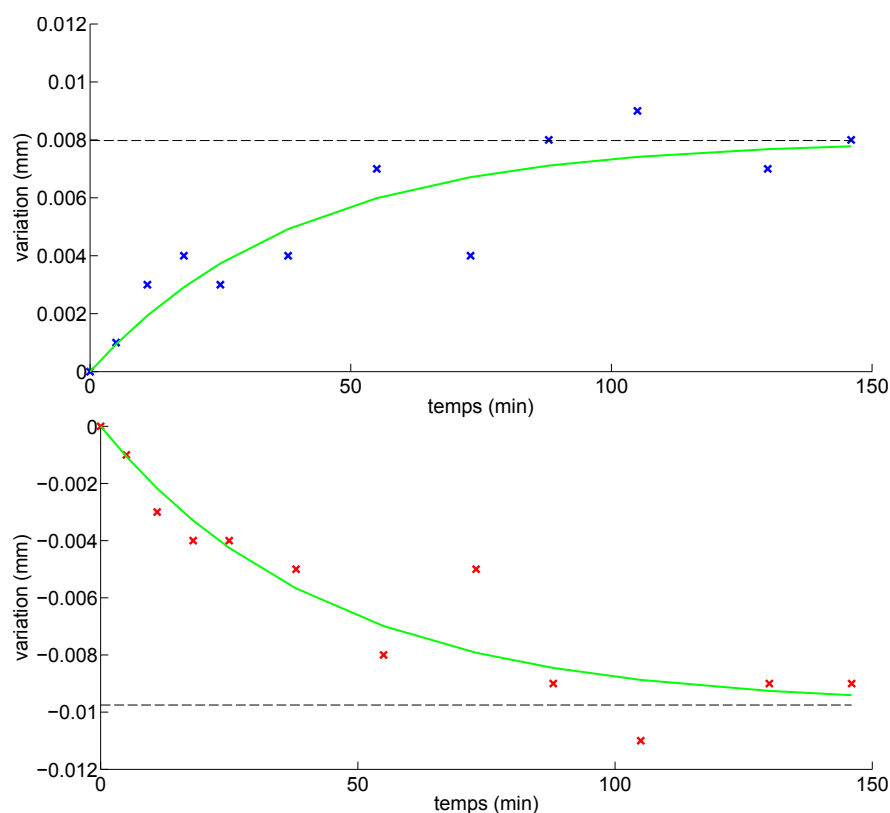


Figure 5.29 – Variations de l'altitude mesurée des deux marches au cours du temps.

inférieure, des mesures réalisées sur une durée importante engendreront forcément des incertitudes plus importantes liées à l'échauffement du capteur.

4.2.4 Influence du recalage rigide

Une forte incertitude provient de l'évaluation de la position réelle des appuis qui soutiennent le *couvercle*. En effet, les appuis étant libres, il n'est pas possible d'évaluer leur position après avoir retiré le composant. Il est donc nécessaire d'évaluer leur position à partir de la numérisation réalisée sur la surface du *couvercle*.

Dans les faits il est possible de déterminer cette position dans le plan (suivant les axes X et Y) à partir des points numérisés sur le contour du trou au niveau duquel est positionné l'appui. Du fait de la direction de numérisation qui engendre une hétérogénéité du nuage de points (échantillonnage des points de la ligne *LASER* différent de l'échantillonnage d'acquisition des lignes), l'étendue de la dispersion évaluée au niveau de l'évaluation de la position réelle des appuis, pour les quinze mesures réalisées précédemment, est de l'ordre de 0.1mm suivant la direction X et de 0.3mm suivant la direction Y , pour chaque appui. Du fait de la faible épaisseur du composant, l'altitude de l'appui est déterminée à partir des points de mesure obtenus sur le sommet de l'appui. Il en résulte pour les quinze mesures réalisées une étendue de dispersion de l'ordre de 0.1mm .

D'autres méthodes ont été envisagées afin de déterminer par la mesure la position des appuis. Il a par exemple été envisagé de positionner des sphères sur les trous en vis à vis des appuis. Cependant la qualité des mesures obtenues par numérisation *LASER* sur des sphères classiques non matifiées n'était pas suffisante. La mesure avec contact a également été envisagée, mais elle ne garantit pas une non modification de l'état géométrique du composant.

Cette variabilité concernant l'évaluation de la position des appuis étant chiffrée, la procédure de géné-

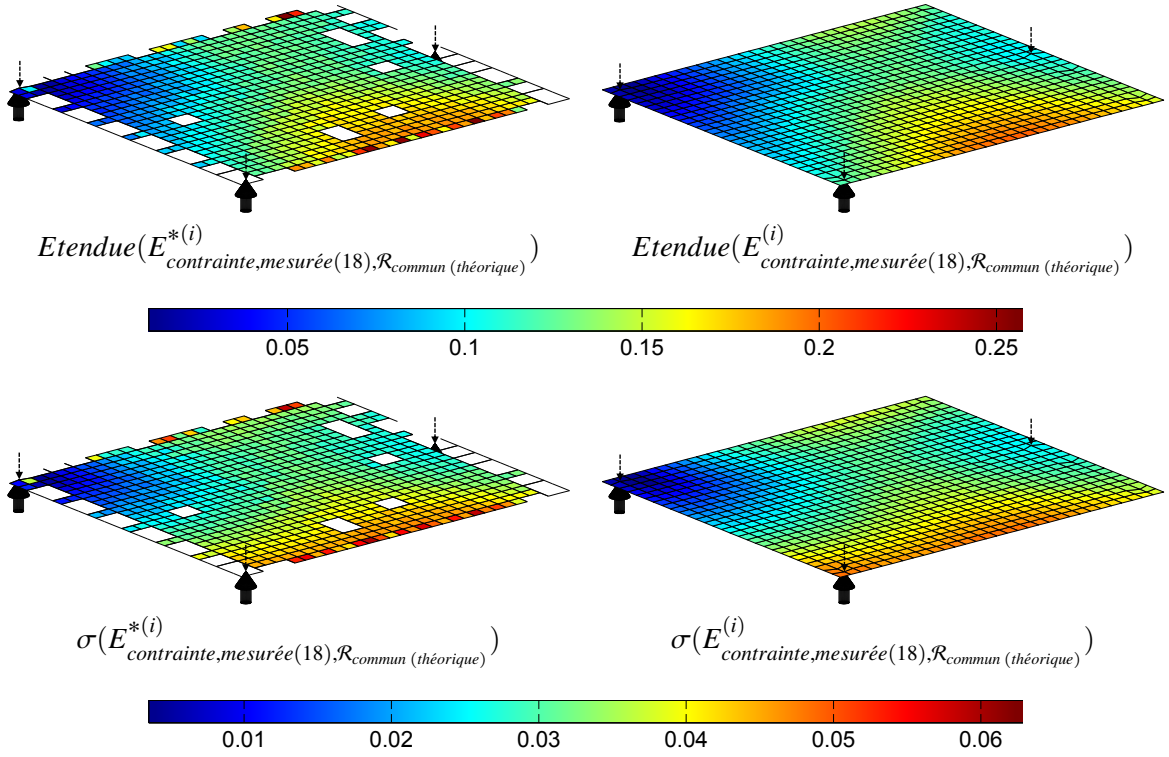


Figure 5.30 – Etendues et écart-types de la dispersion des amplitudes des champs d'écarts (partiels et complets) lorsque les paramètres de recalage rigide varient, $i \in \{1; 15\}$.

ration de champ d'écarts sur les quinze mesures est exécutée une nouvelle fois. Elle est la même que celle décrite en début de section, si ce n'est que cette fois-ci un recalage différent est appliqué à chaque nuage de points de mesure, fonction de la position des appuis évaluée à partir de chaque nuage de points. Les champs d'écarts sont générés, et l'étendue et l'écart-type de la dispersion de l'amplitude de ces champs d'écarts sont évalués en chaque point. Les résultats obtenus sont visibles sur la *Figure 5.30*.

La comparaison des résultats illustrés sur les *Figures 5.25* et *5.30* souligne une augmentation de l'étendue et de l'écart-type de la dispersion des amplitudes des champs évalués sur les mesures lorsque la variation de recalage rigide est prise en compte. L'étendue maximale de la dispersion observée passe de $0.1mm$ à $0.26mm$, et l'écart-type maximal de $0.03mm$ à $0.064mm$. La dispersion et l'écart-type restent relativement faibles au niveau de l'appui G_1 , origine du repère permettant le recalage rigide. Ils ont tendance à augmenter lorsqu'on s'éloigne de ce point, ce qui paraît logique. La variation de position des points permettant le recalage rigide a donc un impact non négligeable sur le champ d'écarts évalué. Cet impact est difficilement quantifiable car pas constant sur toute la géométrie. Par comparaison à l'étendue de la dispersion évaluée pour un recalage identique des nuages de points, l'étendue de la dispersion est ici supérieure de $0.16mm$ (presque trois fois plus importante).

4.2.5 Dimension du filtre

On se place dans la configuration qui génère la plus grande courbure. Il s'agit de la configuration $G_1_{34}_D_{12}$ où la courbure peut atteindre localement $0.000106mm^{-1}$ (valeur évaluée en reconstruisant une surface *Nurbs* sur les points de mesure et en évaluant la courbure maximale à l'aide d'une fonction intégrée au logiciel *Catia V5*), ce qui correspond à un rayon de courbure local de $9433mm$. L'approximation réalisée en choisissant des points dans une zone restreinte lors du filtrage dépend de la courbure locale et de la dimension de cette zone. En approximant la surface mesurée par une sphère, comme illustré sur la *Figure 5.31*, il est possible d'en déduire que l'approximation réalisée est régie par l'équation :

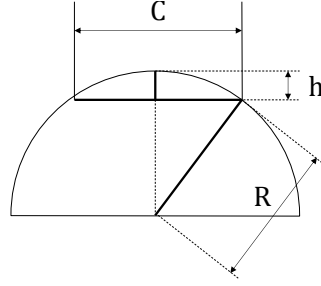
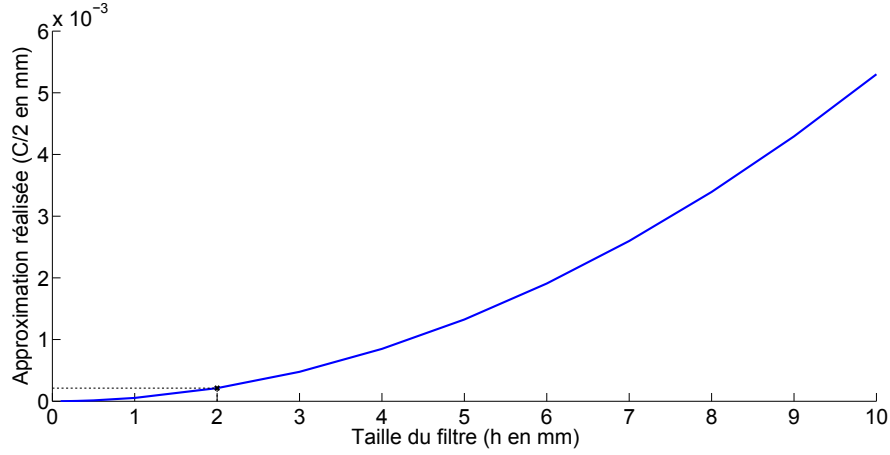


Figure 5.31 – Eléments géométriques impliqués dans l'approximation réalisée.

Figure 5.32 – Evolution de l'approximation réalisée (h en mm) en fonction du rayon du cylindre qui permet le filtrage ($\frac{C}{2}$ en mm), pour un rayon de courbure $R = 9433mm$.

$$h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{C}{2}\right)^2} \quad (5.15)$$

avec R le rayon de la sphère qui approxime localement la surface mesurée,
 C la corde, qui représente le diamètre du cylindre qui permet le filtrage,
 h la hauteur, qui représente l'approximation réalisée.

En imposant R comme le rayon de courbure maximal, il est possible d'étudier l'évolution de l'approximation réalisée en fonction du rayon du cylindre qui permet le filtrage. On peut ainsi tracer la courbe visible sur la Figure 5.32. Pour ce cas précis, il s'avère que l'approximation ne dépassera pas $0.006mm$ même avec un rayon de cylindre de $10mm$. Dans les expérimentations présentées, le rayon de cylindre choisi est de $2mm$, ce qui limite l'approximation réalisée à $0.0003mm$. Celle-ci est donc négligeable dans ce cas.

4.3 Sensibilité au niveau du recalage non rigide

Le recalage non-rigide est réalisé par simulation *Eléments Finis*. On supposera dans le cas présent que les variations liées au choix d'une densité de maillage intéressante vis à vis du problème posé auront un impact négligeable sur le résultat de simulation.

Deux simulations de référence ont été réalisées pour chacune des configurations $G_1_34_D_12$ (12) et $G_1_34_D_18$ (18). Les deux *déformées* obtenues sont visibles sur la Figure 5.33. Elles ont été réalisées à l'aide de paramètres par défaut. Les études liées à la variation des différents paramètres passeront par une comparaison à cette référence, afin d'observer l'impact de ces variations.

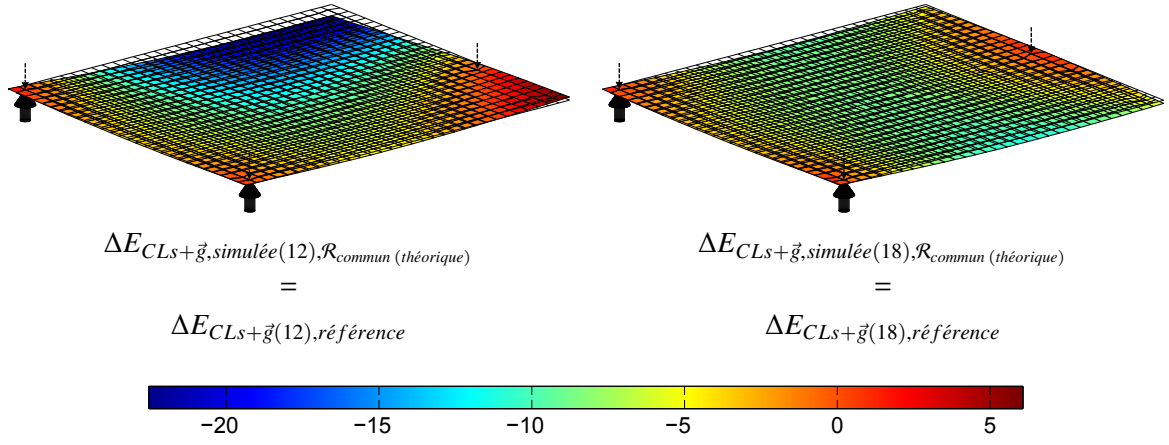


Figure 5.33 – Géométries des *déformées* simulées correspondant aux configurations $G_1_34_D_12$ (12) et $G_1_34_D_18$ (18), avec les paramètres par défaut (écarts en mm).

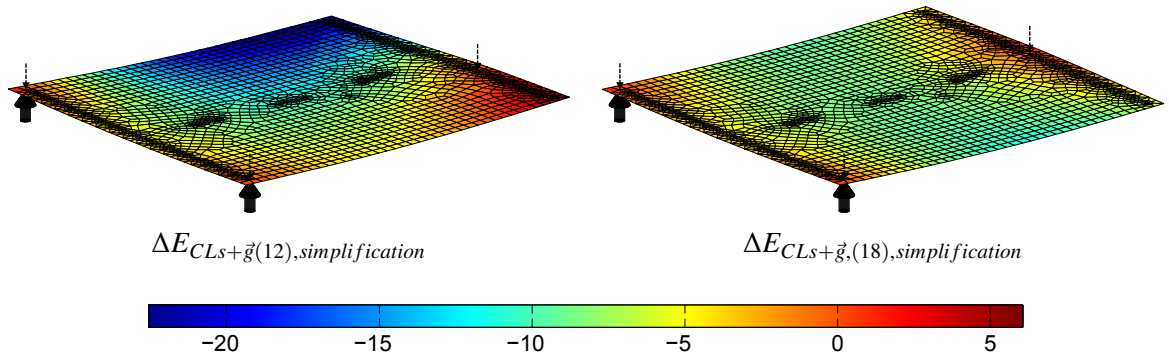


Figure 5.34 – Géométries des *déformées* simulées correspondant aux configurations $G_1_34_D_12$ (12) et $G_1_34_D_18$ (18), sans simplification de la géométrie (écarts en mm).

Par la suite, afin de simplifier les notations, le terme $\Delta E_{CLs+\vec{g},simulée(12),\mathcal{R}_{commun}(théorique)}$ correspondant à la simulation de référence sera noté $\Delta E_{CLs+\vec{g}(12),référence}$. De même pour les autres déformées évaluées par la simulation. Par exemple on utilisera la notation $\Delta E_{CLs+\vec{g}(12),\delta épaisseur}$ pour la déformée impliquant une variation du paramètre d'épaisseur. Les termes seront tous exprimés dans le repère théorique commun $\mathcal{R}_{commun}(théorique)$.

4.3.1 Simplification et idéalisation de la géométrie

Dans le contexte de la simulation d'assemblage de structures aéronautiques, les opérations de simplification et d'idéalisation des géométries sont nécessaires afin de construire des modèles relativement légers. Cependant ces modifications génèrent potentiellement des variations sur le résultat de simulation obtenu, par rapport à un résultat de simulation prenant en compte la géométrie de la forme réelle du composant.

Dans le cas du *couvercle*, comme présenté dans la *Section 2.2.1*, les trous qui existent au niveau de la géométrie de la forme réelle n'existent pas au niveau de la géométrie virtuelle simplifiée. Cependant leur présence (ou leur absence) a potentiellement une influence sur le résultat de la simulation. En effet, afin de mettre en avant cette influence, deux résultats de simulation ont été comparés, avec et sans trous. La présence des trous influence directement la discrétisation, qui perd sa régularité. Il est donc difficile de procéder à une comparaison directe entre les noeuds des maillages. Cependant si on observe les valeurs maximales de l'amplitude des déformées représentées sur la *Figure 5.34*, on constate que la variation observée pour la configuration $G_1_34_D_18$ (18) est de $0.02mm$, et de $0.015mm$ pour la configuration $G_1_34_D_12$ (12).

Ces valeurs restent relativement faibles, et prouvent que le choix de simplification est dans ce cas pertinent.

L'idéalisation de la géométrie consiste à considérer dans le cas présent le couvercle non pas comme un volume, mais comme une surface à laquelle est associée une certaine épaisseur. Cela permet de simplifier la modélisation associée au composant, puisque la géométrie discrète est beaucoup plus simple. La *Figure 5.35* représente les déformées simulées à partir d'un modèle volumique. La discrétisation a été conservée de façon à pouvoir comparer les résultats obtenus. On observe ainsi des écarts importants entre les déformées obtenues à l'aide des deux modèles. Ils sont de l'ordre de 1mm pour les deux configurations. Difficile toutefois de savoir quel modèle permet d'obtenir les meilleurs résultats, le modèle volumique n'étant pas toujours le plus performant.

Le modèle choisi est un modèle coque, c'est à dire que la géométrie du couvercle est représentée par des éléments $2D$, et qu'une épaisseur est associée à ce modèle. Du fait du procédé d'obtention du composant, l'incertitude concernant l'épaisseur est relativement faible. Des simulations ont été réalisées, faisant varier cette épaisseur de $\pm 0.01\text{mm}$ autour de l'épaisseur théorique de $1,5\text{mm}$. La variation du champ d'écarts correspondant à la *déformée* simulée, visible sur la *Figure 5.36*, est de l'ordre de 0.3mm au niveau de l'amplitude maximale. Cette variation est suffisamment faible (environ 1%(12) et 2%(18) de l'amplitude maximale) pour considérer l'épaisseur théorique.

La simulation de référence est réalisée avec des éléments *COQ4*. L'utilisation d'éléments *COQ8* génère une différence de l'ordre de 0.4mm pour la configuration *G_1_34_D_12* (12) (environ 1.4% de l'amplitude maximale), et de 0.2mm pour la configuration *G_1_34_D_18* (18) (environ 1.5% de l'amplitude maximale). Il est plus pertinent d'utiliser des éléments du second ordre dans le cas d'un composant soumis à de la flexion. Cependant la faible différence nous incite à choisir les éléments du premier ordre afin de simplifier la modélisation.

4.3.2 Perturbations extérieures

Classiquement le maintien en position du composant permet de limiter les effets de l'environnement sur le composant. Dans le cas de la mesure sans contact, il ne semble pas nécessaire de réaliser ce maintien. En effet, les efforts mis en jeu lors de la mesure se limitent aux effets de la gravité. Cependant il est possible que l'environnement influe sur la *géométrie contrainte* réelle du composant. Il pourrait par exemple s'agir de vibrations provoquées par le déplacement des axes de la machine à mesurer tridimensionnelle.

Afin d'observer la sensibilité de la géométrie à la configuration de mesure choisie, des simulations ont été réalisées, pour chacune des configurations, en plaçant une masse ponctuelle dans une certaine zone. Il est possible d'observer sur les *Figures 5.37* et *5.38* les résultats obtenus.

Il semblerait que le choix de la configuration de mesure influe sur la sensibilité du composant aux effets de l'environnement extérieur. En effet, la configuration *G_1_34_D_12* semble plus sensible. Cela paraît logique puisque c'est celle qui semble la moins stable. D'où l'intérêt de choisir une configuration de mesure qui maximise la stabilité. La distance entre la masse et l'appui augmente en passant de la configuration *G_1_34_D_18* (18) à la configuration *G_1_34_D_12* (12), d'où l'écart amplifié entre les deux déformées. Cet écart n'est cependant pas lié uniquement à l'écart des bras de levier.

On observe également que la position de la masse en question a une importance. Ainsi la géométrie du composant semble plus sensible aux effets de l'environnement en dehors du polygone de sustentation, et loin des appuis. Il sera ainsi judicieux de définir une configuration qui maximise la surface de ce polygone de sustentation.

La configuration *G_1_34_D_18* (18) semble ainsi être la mieux adaptée, afin de limiter les effets des variations de l'environnement extérieur.

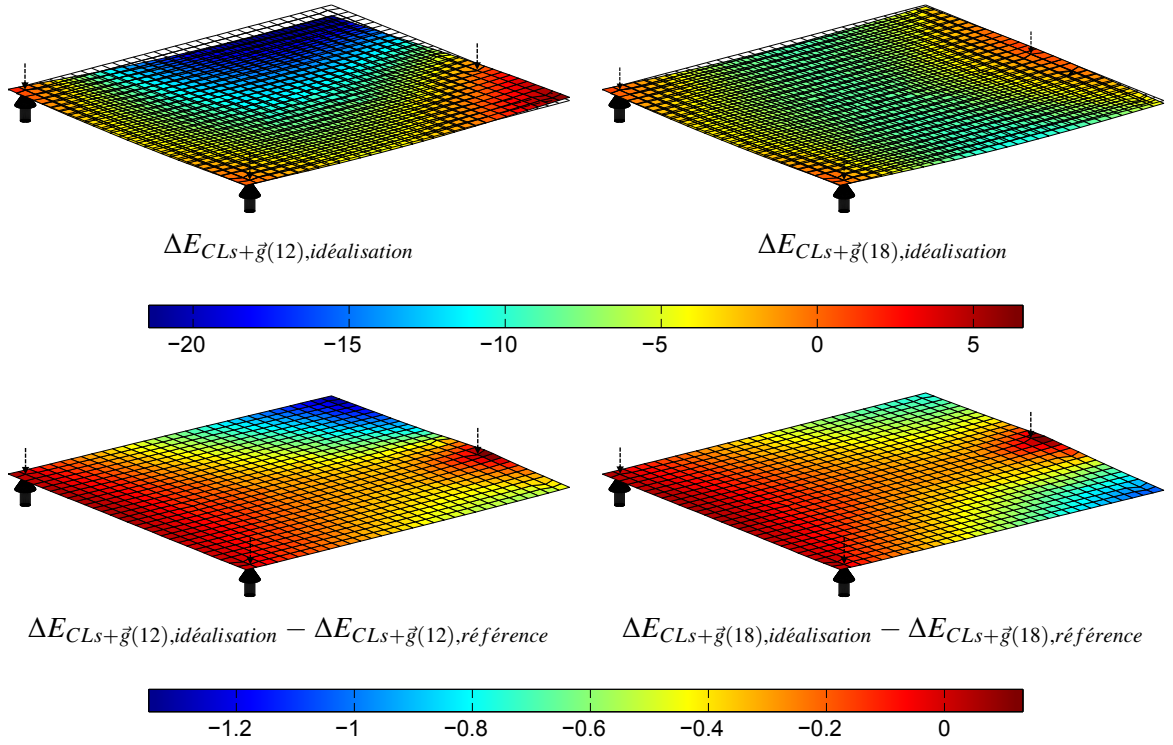


Figure 5.35 – Géométries des *déformées* simulées correspondant aux configurations $G_1_{34}D_{12}$ (12) et $G_1_{34}D_{18}$ (18), sans idéalisation de la géométrie (écarts en mm). Ecart aux simulations de référence correspondantes (écarts en mm, amplitude facteur 10).

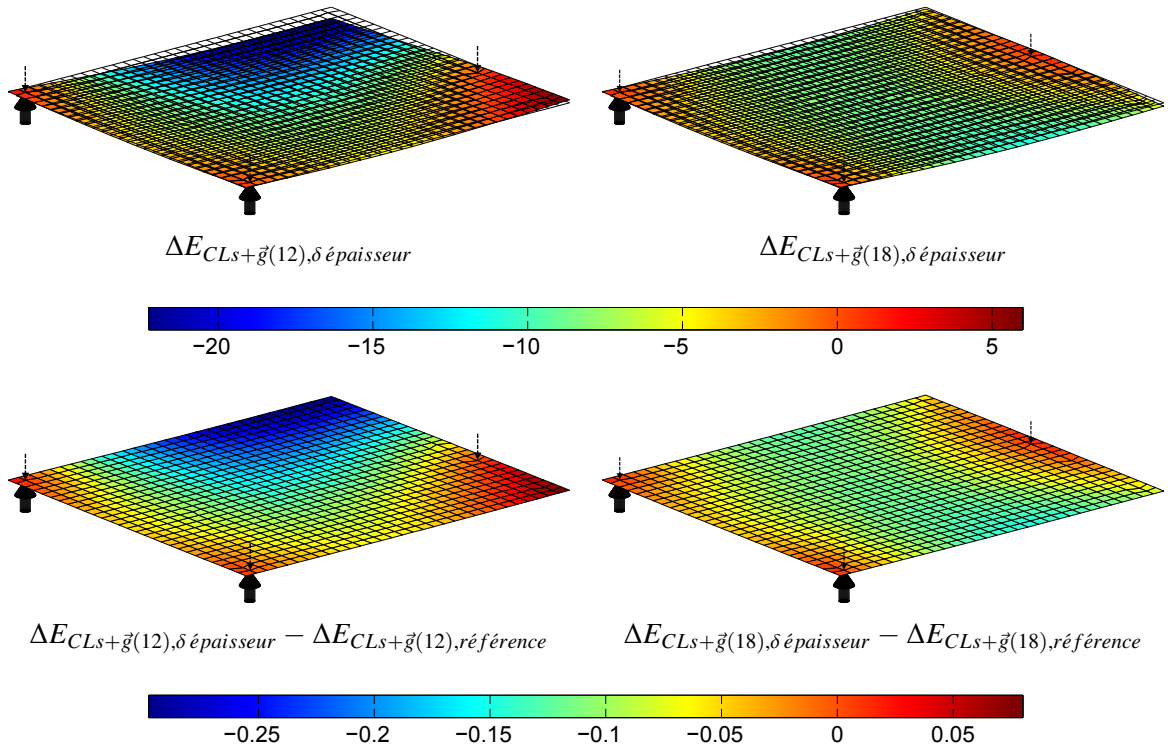


Figure 5.36 – Géométries des *déformées* simulées correspondant aux configurations $G_1_{34}D_{12}$ (12) et $G_1_{34}D_{18}$ (18), avec une épaisseur de $1.5\text{mm} + 0.01$ (écarts en mm). Ecart aux simulations de référence correspondantes (écarts en mm, amplitude facteur 10).

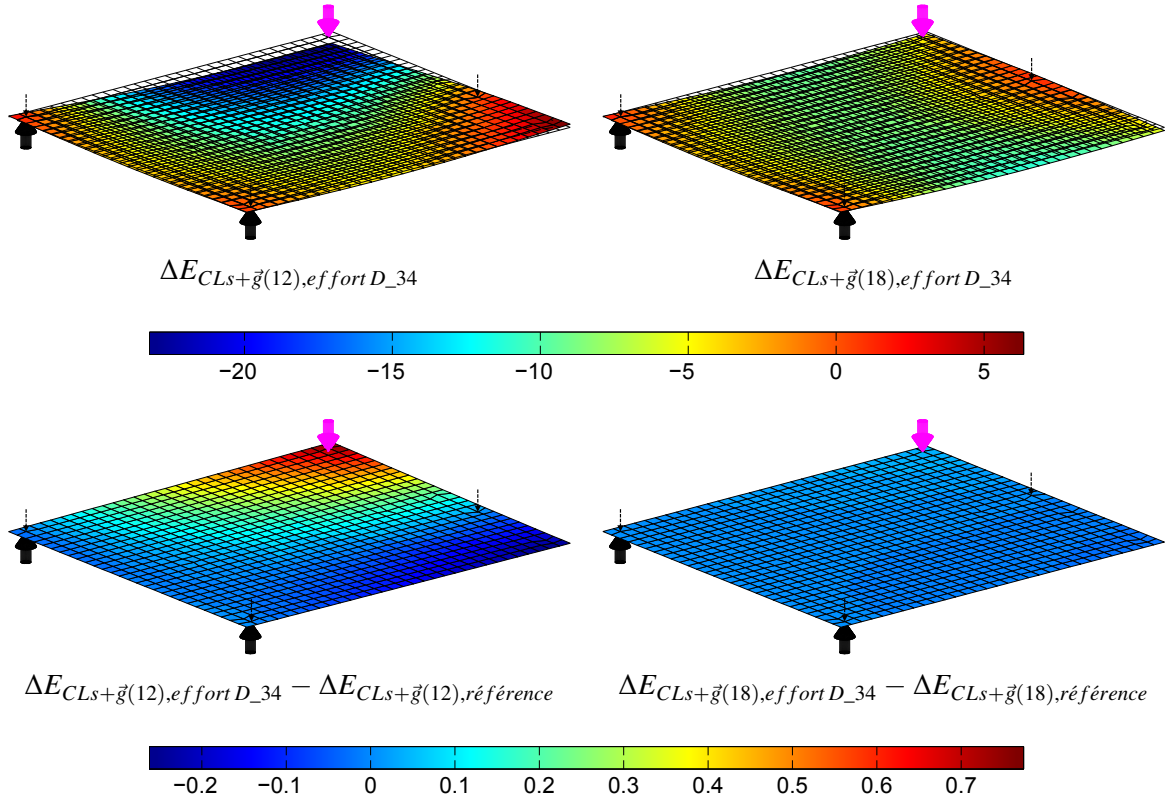


Figure 5.37 – Géométries des *déformées* simulées correspondant aux configurations $G_1_{34}_D_{12}$ (12) et $G_1_{34}_D_{18}$ (18), avec un masse ponctuelle de 10g appliquée en D_{34} (écarts en mm). Ecart aux simulations de référence correspondantes (écarts en mm, amplitude facteur 10).

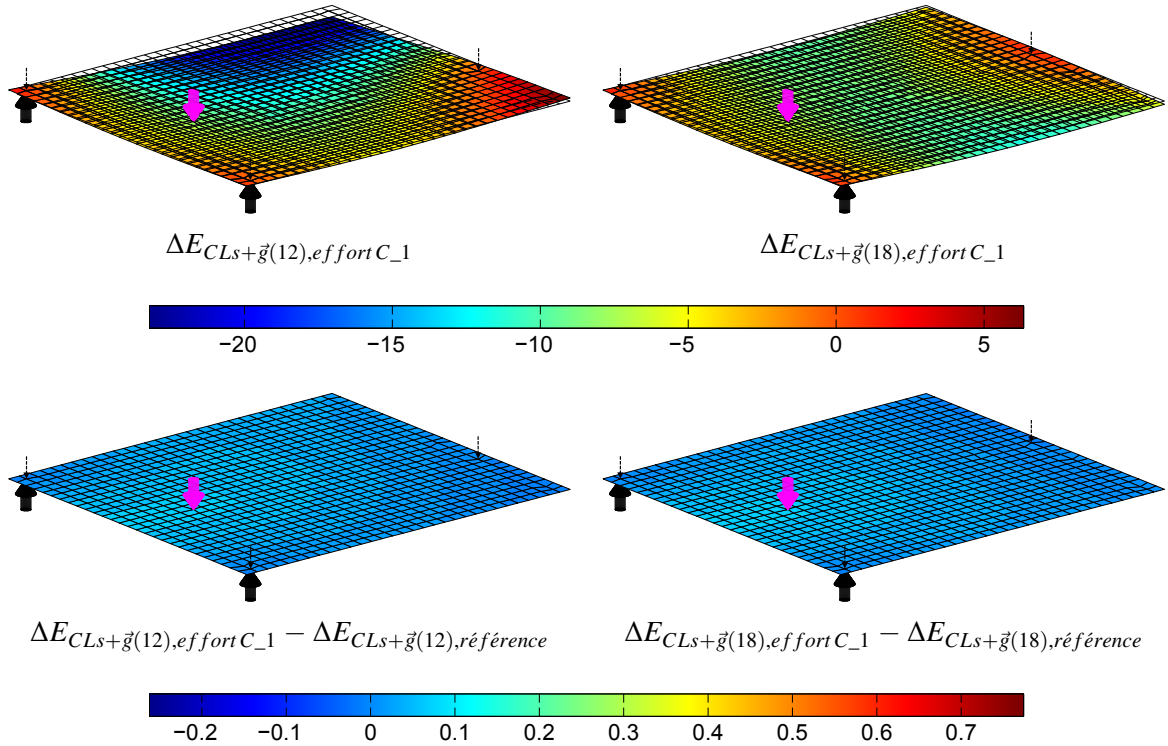


Figure 5.38 – Géométries des *déformées* simulées correspondant aux configurations $G_1_{34}_D_{12}$ (12) et $G_1_{34}_D_{18}$ (18), avec un masse ponctuelle de 10g appliquée en C_1 (écarts en mm). Ecart aux simulations de référence correspondantes (écarts en mm, amplitude facteur 10).

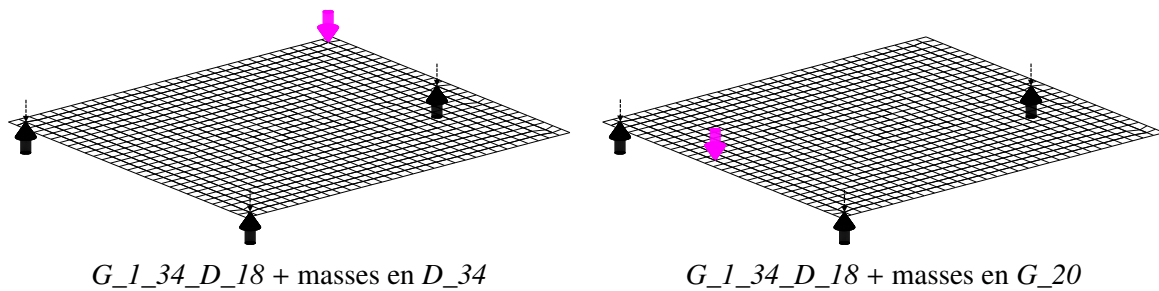


Figure 5.39 – Configurations de *recalage de modèle* étudiées, à partir de la configuration $G_1_34_D_18$ (18), avec application de masses respectivement en D_{34} et G_{20} .

4.3.3 Paramètres matériau

Les paramètres matériau ont été choisis au nominal (dans la base de données du logiciel *Catia V5*), car il ne sont a priori pas connus. Ils sont donc potentiellement source d'écarts importants entre la déformée réelle et la déformée simulée. Dans le cadre de la mesure de pièce souple soumise à son poids propre et non maintenue, les paramètres qui semblent être prépondérants sont le *module d'Young* E (valeur théorique 70GPa) et la *masse volumique* ρ (valeur théorique 2710Kg/m^3).

Afin d'évaluer les valeurs de ces deux paramètres à partir des données de mesure, il est possible de réaliser un *recalage de modèle*. Il s'agit de déterminer les valeurs des paramètres du modèle qui permettent, aux points de mesure, de faire correspondre au mieux la réponse du modèle avec ces données de mesure.

L'algorithme de *recalage de modèle* développé par [Rosenzweig, 2011] a été utilisé afin de recalibrer le *module d'Young* du couvercle en alliage d'aluminium. Cet algorithme a été testé et validé sur des mesures simulées, c'est à dire sur des données virtuelles artificiellement bruitées. Il s'agit cette fois de l'expérimenter sur des données de mesure réelles. Le recalage du *module d'Young* nécessite de solliciter le couvercle afin que sa déformée dépende de ce paramètre. C'est également le cas pour la *masse volumique*, ce qui pose problème dans ce cas, car il serait nécessaire de modifier l'orientation de la gravité par rapport au composant. N'ayant pas de support pour réaliser cette manœuvre, le recalage de la *masse volumique* n'a pas été étudié.

Il est tout d'abord nécessaire de définir un scénario de *recalage de modèle*. La configuration initiale choisie est la configuration $G_1_34_D_18$. Il s'agit alors d'appliquer au couvercle une masse en différents points afin d'en observer la conséquence sur la géométrie réelle. Plus précisément deux masses différentes sont appliquées successivement en un même point, et deux mesures sont réalisées. La différence des deux mesures est alors étudiée, et comparée à la simulation de la déformée engendrée par la différence de masse. Le fait de travailler par différence permet de simplifier la modélisation du problème, puisque le défaut géométrique, présent au niveau des deux mesures, s'annule et n'est pas pris en compte dans la modélisation. Les configurations étudiées sont visibles sur la Figure 5.39.

Les résultats obtenus ont mis en avant, pour une configuration de recalage de modèle donnée, que :

- L'algorithme utilisé est très sensible à la valeur d'initialisation du paramètre choisi (entre 50 et 100GPa). En fonction de cette valeur utilisée il y a des variations de l'ordre de 1 à 2GPa sur la valeur du *module d'Young* recalé. Si la valeur est trop éloignée il y a parfois des problèmes de convergence.
- Le choix des points de mesure n'est pas évident. Le choix aléatoire des points de mesure a montré une variation beaucoup trop importante du résultat, de l'ordre de 20GPa . Lorsque les points sont choisis judicieusement, cette variation se limite à 2GPa . Il semble ainsi approprié dans ce cas de choisir des points de mesure proches des appuis et de la masse utilisée, et répartis sur l'ensemble de la surface mesurée.
- Trop de points génèrent un bruit de mesure auquel l'algorithme est très sensible. Il est ainsi difficile de déterminer le nombre de points maximal à utiliser.

Le module d'Young recalé à l'aide de cet algorithme est de l'ordre de 88GPa pour la configuration de recalage avec une masse en D_{34} , et de 65GPa pour la configuration de recalage avec une masse en G_{20} . La grande disparité de ces valeurs, et la difficulté à les obtenir nous pousse à émettre des craintes quant à sa mise en œuvre sur le support expérimental. Ainsi, ne pouvant pas exploiter les résultats obtenus, il a été envisagé de recalculer les paramètres matériau d'une autre façon.

Connaissant la *géométrie à l'état libre* obtenue par retournement, il est possible d'utiliser cette référence pour la comparer à la *géométrie à l'état libre* évaluée par mesure et par compensation des effets de l'environnement. Les écarts entre ces géométries ont été présentés sur la *Figure 5.23* de la *Section 3.2.2*.

Afin de déterminer si les paramètres matériau ont une influence sur ces écarts, c'est-à-dire si une erreur au niveau de ces paramètres peut expliquer ces écarts, on choisit d'analyser la décomposition modale de ces écarts dans une base constituée de modes définis à partir des variations observées entre la simulation de référence et une simulation dans laquelle on modifie la valeur d'un seul paramètre. Chaque mode ainsi défini peut être vu comme une signature caractéristique de l'influence d'un paramètre sur la déformée obtenue. On suppose dans ce cas que dans le contexte la variation peut être considérée comme linéaire.

On choisit dans un premier temps de normer les modes afin de pouvoir comparer leur influence respective. Il sera toutefois plus compliqué de remonter à la valeur du paramètre qu'il représente. Par contre les modes ne sont pas orthogonalisés, c'est à dire qu'il n'y aura pas unicité de la décomposition modale. En effet, il est difficile de supposer l'influence de la variation des paramètres indépendante. Il est possible que certains paramètres influent de manière similaire sur la déformée simulée. Il est donc important de pouvoir observer ces aspects. La correction sera cependant plus complexe.

Les modes obtenus en analysant la variation de la déformée simulée conséquence de la variation d'un des paramètres du modèle sont visibles sur la *Figure 5.40*. Les deux premiers modes, qui correspondent aux paramètres matériau, semblent relativement proches.

La contribution de ces modes vis à vis des écarts entre les *géométries à l'état libre* obtenues par retournement et par la mesure et la compensation des effets de l'environnement est ensuite évaluée. Les résultats obtenus sont illustrés sur la *Figure 5.41*. On observe que les contributions liées aux deux premiers modes qui correspondent aux paramètres matériau sont sensiblement les mêmes (variation de 0.004 pour la configuration $G_{1_34_D_{12}}$ (12) et de 0.006 pour la configuration $G_{1_34_D_{18}}$ (18)). Cela paraît cohérent puisque les modes visibles sur la *Figure 5.40* sont visuellement très proches.

Les différences de contributions entre les deux configurations, pour un même mode, viennent du fait que les modes ont été normés afin de procéder à une comparaison faisant abstraction de la valeur de variation des paramètres choisie. La *Figure 5.42* représente cette fois-ci les contributions évaluées à partir des modes non normés. Il est difficile d'interpréter directement les contributions de ces modes. Cependant on observe que pour un paramètre matériau donné, et donc pour une variation donnée de ce paramètre (la même pour les deux configurations), les contributions pour les deux configurations sont relativement proches. Les deux configurations choisies permettent donc d'aboutir aux mêmes conclusions.

Les mêmes expérimentations ont été réalisées en observant l'impact de la variation d'épaisseur sur l'écart entre les *géométries à l'état libre* obtenue par retournement et par mesure et compensation des effets de l'environnement. Les résultats visibles, sur les figures précédentes, permettent également d'aboutir aux mêmes conclusions concernant les paramètres matériaux.

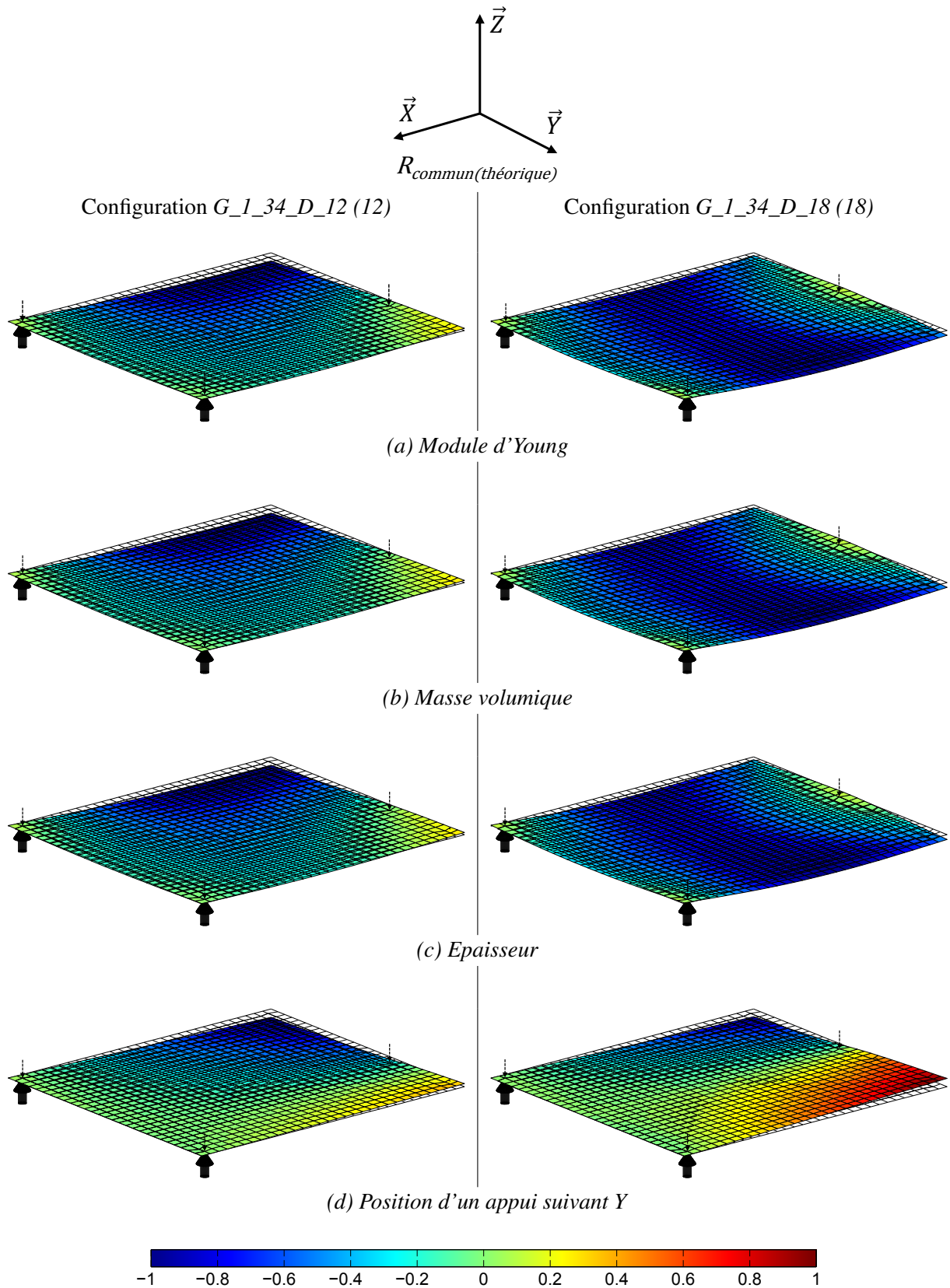


Figure 5.40 – Modes de variation de la déformée simulée normés correspondant aux configurations de mesure $G_1_34_D_{12}$ (12) et $G_1_34_D_{18}$ (18). Modes correspondant à une variation du *module d'Young* (a), de la *masse volumique* (b), de l'*épaisseur* (c), de la *position de l'appui D_i ($i = 12$ ou 18) suivant la direction Y* (d) (écarts en mm, amplitude facteur 20).

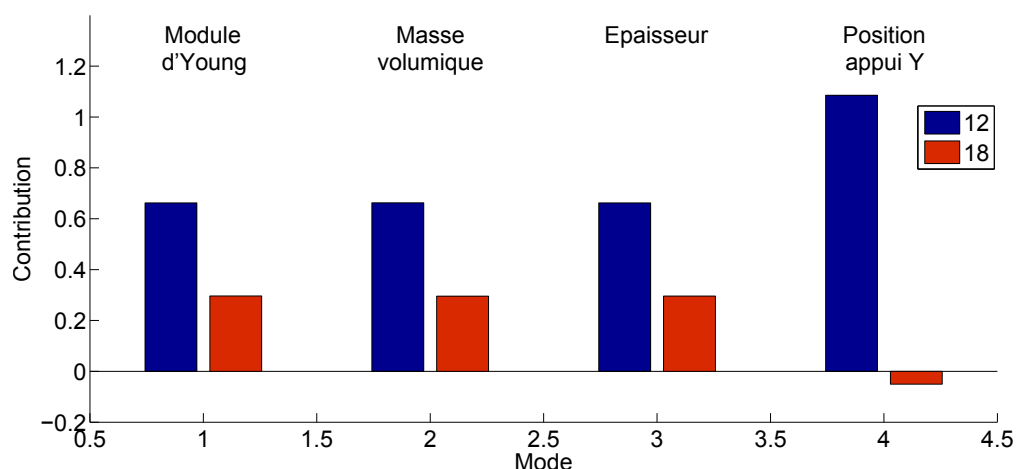


Figure 5.41 – Contributions observées pour chacun des modes normés liés à un paramètre, pour les configurations $G_I_34_D_12$ (12) (en bleu) et $G_I_34_D_18$ (18) (en rouge).

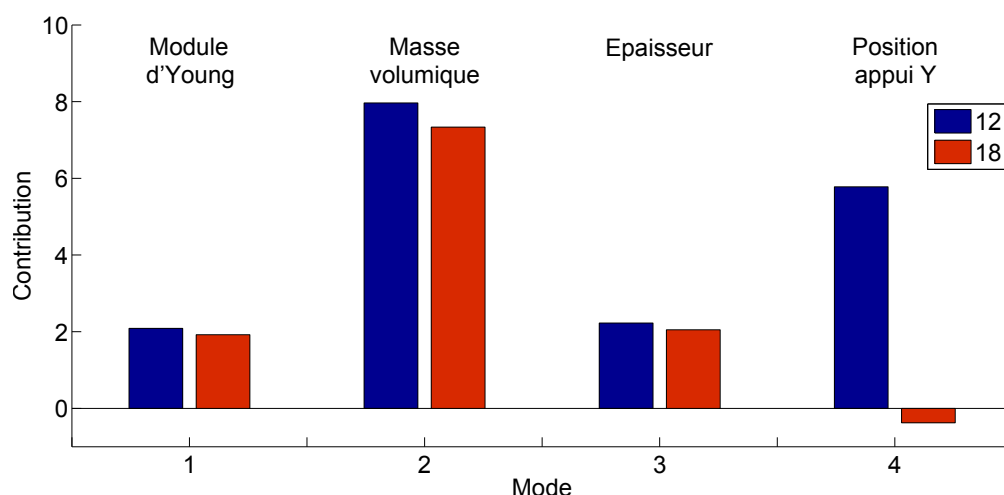


Figure 5.42 – Contributions observées pour chacun des modes non normés liés à un paramètre, pour les configurations $G_I_34_D_12$ (12) (en bleu) et $G_I_34_D_18$ (18) (en rouge).

Il est alors possible de remonter à la valeur des paramètres matériaux qui permettent de modéliser de façon plus fidèle le comportement réel. Les valeurs obtenues sont rangées dans le *Tableau 5.1*. Les simulations des déformées sont alors réalisées avec les nouvelles valeurs de ces paramètres.

Ces corrections permettent d'obtenir une *géométrie à l'état libre* plus proche de la géométrie obtenue par retournement. En effet, concernant la configuration $G_I_34_D_12$ (12) les écarts maximaux sont réduits d'environ $1.8mm$ (au niveau des coins du bord droit du couvercle). Cela permet de réduire l'effet du vrillage autour de l'appui D_12 . Les écarts minimaux augmentent légèrement (au centre du couvercle), de l'ordre de $0.5mm$. Concernant la configuration $G_I_34_D_18$ (18) les écarts maximaux sont réduits d'environ $0.5mm$ (au niveau des coins du bord droit du couvercle également). Les écarts minimaux augmentent légèrement (au centre du couvercle), de l'ordre de $0.2mm$.

Ces corrections permettent ainsi d'améliorer la modélisation du problème, puisque les paramètres matériau sont identifiés à partir de la mesure. Cependant il est nécessaire d'avoir une représentation de la *géométrie à l'état libre* pour pouvoir réaliser cette correction. De plus on observe que les corrections effectuées ne sont pas suffisantes, puisqu'il subsiste encore des écarts entre les géométries. Ces écarts sont également différents pour les deux configurations.

	Module d'Young	Masse volumique	Epaisseur	Position appui Y
Valeur nominale	70GPa	2710Kg/m ³	1.5mm	460mm (12) 340mm (18)
Valeur corrigée (G_1_34_D_12)	72.09GPa	2631Kg/m ³	1.523mm	454.22mm (-5.78mm)
Valeur corrigée (G_1_34_D_18)	71.92GPa	2637Kg/m ³	1.521mm	340.38mm (+0.38mm)

Tableau 5.1 – Tableau résumant les corrections apportées sur les paramètres étudiés.

4.3.4 Position d'un appui

L'incertitude sur l'évaluation de la position des points d'appui peut être une source d'erreur. En effet, la variation de position d'un appui va engendrer une variation de la déformée simulée. L'effet de la variation de position d'un appui suivant la direction *Y* a ainsi été évalué. L'expérience a montré que la variation de la position suivant la direction *X* a un effet moindre dans le cas des deux configurations étudiées, et que cet effet se rapproche de l'effet conséquence d'une variation des paramètres matériaux.

La même démarche que pour les paramètres matériau a été menée. Ainsi il est possible d'observer sur la *Figure 5.40* le quatrième mode correspondant à une variation de la position de l'appui *D_12* ou *D_18* suivant la direction *Y*. La contribution de ce mode est très différente de celle des autres modes. Si on observe plus particulièrement la *Figure 5.42*, on observe une différence notable entre les contributions observées pour les deux configurations. Les valeurs des variations de la position de l'appui suivant la direction *Y* sont visibles dans le *Tableau 5.1*. La valeur nécessaire à la correction correspond dans le cas de la configuration *G_1_34_D_12* (12) à une variation de la position de l'appui *D_12* de 5.78mm. Cette valeur n'est pas cohérente avec le contexte (appuis positionnés dans des trous), ni avec l'incertitude estimée sur la position des appuis évaluée par la mesure (estimée à 0.3mm suivant la direction *Y*).

Ceci amène donc à reconsidérer la modélisation du problème. En effet, un phénomène non pris en compte dans la simulation semble influencer sur la déformée réelle. Ce phénomène semble se manifester de façon plus prononcée lorsque la configuration est plus sensible aux perturbations extérieures. Deux pistes sont envisagées :

- ✦ *Le décollement du couvercle* au niveau des appuis. Il est possible que dans certains cas, par exemple lorsque la configuration de mesure engendre une déformée trop importante, le contact au niveau des appuis se déplace. Potentiellement si le contact ne se fait plus sur tout le contour du trou, le centre de la liaison ponctuelle se déplace alors du centre du cercle du trou en contact avec l'appui bombé vers un point au niveau du contour de ce trou. Ce déplacement est alors de l'ordre de 3mm dans le plan (car les trous font théoriquement 6mm de diamètre), et de 0.5mm vers le bas dans la direction normale au plan (car les appuis font nominale 16mm de diamètre). Ce phénomène pourrait expliquer une partie des variations constatées. Il est cependant difficile de déterminer expérimentalement si le contact se fait correctement. La solution la plus simple est de rejeter les configurations qui sont trop instables, comme semble l'être la configuration *G_1_34_D_12* (12).
- ✦ *Le frottement* au niveau des appuis. La liaison globale réalisée par chaque appui est une ponctuelle, mais elle est composée d'un appui plan avec le marbre et d'une rotule au niveau du trou du *couvercle*. La réalisation de ces liaisons peut engendrer du frottement, principalement au niveau de la rotule. En effet, le contact entre le cercle correspondant au trou du *couvercle* et la sphère correspondant à l'appui bombé est relativement étendu. Ce phénomène de frottement est d'une part difficile à quantifier expérimentalement, et d'autre part difficile à introduire au niveau de la modélisation.

Dans les deux cas ces effets semblent s'ajouter s'ils sont présents simultanément, ce qui pourrait expliquer la valeur de la variation nécessaire à la correction.

4.4 Synthèse et définition d'un cadre pour la mise en œuvre de la méthode

Pour résumer, il s'avère que le processus d'acquisition et de génération d'un champ d'écarts représentatif de la mesure soit sujet à de nombreuses incertitudes. En effet, le résultat d'acquisition peut être soumis à de fortes variations dans le cas où le capteur *LASER* plan n'est pas mis en température à l'aide d'un cycle de chauffe. A température constante il semble que les variations observées au niveau de la géométrie mesurée soient de l'ordre de quelques microns, à altitude de numérisation et orientation du capteur constantes. Le cycle de chauffe est ainsi indispensable afin de limiter les variations.

Dans les faits, l'altitude et l'orientation du capteur par rapport à la surface ne sont pas constantes. Malgré les précautions prises pour garantir une variation d'altitude comprise dans l'intervalle préconisé par [Audfray, 2012] et une variation d'orientation relativement faible, il est probable que la justesse de mesure évolue en fonction de la zone de la pièce numérisée. Ceci est en tout cas observé pour le bruit.

La principale cause de variations provient alors du recalage rigide, ou plus particulièrement de l'évaluation, à partir des données de mesure, de la position réelle des appuis. Dans le cas présent il est difficilement possible de trouver une alternative qui garantisse la non modification de la géométrie contrainte lors de la mesure. Il a été envisagé de numériser le couvercle également dans la direction orthogonale afin de limiter les incertitudes suivant la direction *Y*. Cependant les erreurs liées au recalage des vues risquent d'être tout aussi problématiques. Cette phase est ainsi jugée comme la phase la plus critique du processus d'acquisition et de traitement permettant de générer un champ d'écarts représentatif de la *géométrie contrainte* mesurée.

Concernant la simulation, l'étude a mis en avant les problèmes liés à la modélisation des conditions réelles de mesure. Premièrement les hypothèses posées afin de définir le modèle de simulation sont sources d'écarts. La simplification, l'idéalisation et la discrétisation peuvent ainsi générer des écarts non négligeables. Dans le contexte, la simplification et l'idéalisation semblent toutefois bien adaptées. L'influence de la discrétisation n'a pas été étudiée, et est considérée comme négligeable.

Le modèle ainsi retenu, sur lequel repose la simulation de la déformée, implique une dizaine de paramètres, qui ne sont pas connus a priori. Certains de ces paramètres n'ont que peu d'influence sur le résultat, mais d'autres semblent prépondérants. Les paramètres matériau ont ainsi une importance majeure puisqu'ils conditionnent la réponse du modèle mécanique. Deux méthodes ont été expérimentées afin d'évaluer, à partir des données de mesure, les valeurs de ces paramètres. L'analyse modale des écarts entre la *géométrie à l'état libre obtenue par retournement*, prise comme référence, et la *géométrie à l'état libre obtenue par mesure et par compensation des effets de l'environnement*, a ainsi permis d'évaluer des valeurs des paramètres matériau permettant de corriger les résultats obtenus. Cependant cette *géométrie à l'état libre* n'est normalement pas connue a priori, ce qui souligne la difficulté d'identification des paramètres matériau.

L'étude a également permis de mettre en avant un phénomène parasite non pris en compte dans la modélisation. Celui-ci n'est pas identifié avec certitude, mais les deux options envisagées impliquent dans tous les cas une modification du modèle qui nécessiterait une étude approfondie. Il est cependant possible de conclure quant à l'importance du choix de la configuration de mesure afin de limiter les effets de ce phénomène. Une configuration de mesure garantissant la stabilité et minimisant la pente de la plaque au niveau des appuis bombés semble dans le cas présent bien adaptée.

Il est difficile de quantifier les incertitudes relatives aux deux étapes, de mesure et de génération d'un champ d'écarts représentatif de la *géométrie contrainte* mesurée, et de recalage non-rigide de ce champ d'écarts par la simulation *Eléments Finis*. En effet, le nombre de paramètres important rend l'étude complexe. Il est cependant possible de se placer dans un cadre qui permet de limiter ces incertitudes par :

- ✈ Le choix d'un système de mesure adapté, et l'utilisation du système dans des conditions optimales.
- ✈ Le choix d'une configuration de mesure garantissant la stabilité du composant et le contact au niveau des appuis définis. Limiter la déformée permet notamment de limiter les effets parasites au niveau des appuis.
- ✈ La définition précise de l'environnement dans lequel est mesuré le composant, principalement l'orientation de la gravité par rapport au composant et son support de mesure. La température non régulée de l'atelier d'assemblage peut également avoir son importance.
- ✈ La connaissance de la position réelle des conditions aux limites. L'information apportée par l'évaluation de cette position par la mesure doit permettre de rapprocher le modèle utilisé de la réalité. Cette évaluation doit être la plus juste possible.
- ✈ Le choix d'un modèle adapté pour représenter la géométrie et le comportement mécanique. Dans le contexte de la simulation d'assemblage aéronautique il est nécessaire de trouver un compromis entre la finesse du modèle *Eléments Finis* et le coût de calcul.
- ✈ L'évaluation des paramètres matériau reflétant le comportement réel, à partir des données de mesure. Dans le cas où la simplification et l'idéalisation de la géométrie sont conséquentes (disparition de raidisseurs, ...), cette étape est alors cruciale.
- ✈ La modélisation fidèle du comportement des liaisons entre le composant et son support de mesure.

Dans un contexte industriel, l'utilisation d'un support qui n'assure pas le maintien en position des composants semble difficilement envisageable. Les appuis ponctuels seraient remplacés par des appuis bilatéraux rotulés. La gestion des contacts serait alors plus évidente. Cependant il s'agirait de modéliser correctement le comportement de ces appuis rotulés afin de pouvoir compenser de manière cohérente leurs effets sur la géométrie du composant.

La méthode permet tout de même un apport considérable dans le domaine de la simulation d'assemblage à partir de la mesure de composants souples. En effet, sans l'utilisation de celle-ci pour évaluer la *géométrie à l'état libre*, la simulation d'assemblage est réalisée à partir de la géométrie de référence (sans défauts géométriques et sans déformée) ou à partir de la géométrie contrainte mesurée (avec défauts géométriques et avec déformée). Dans les deux cas l'approximation réalisée est très importante. En prenant comme référence la *géométrie à l'état libre* obtenue par retournement dans la configuration *G_1_34_D_18 (18)*, l'amplitude des défauts géométriques est de l'ordre de $7mm$, ce qui correspond à l'approximation dans le premier cas. Dans le second, c'est l'amplitude de la déformée, de l'ordre de $12mm$, qui correspond à l'approximation réalisée. La méthode mise en œuvre permet à l'heure actuelle de réduire cet écart à $2mm$, ce qui représente une amélioration de 71% par rapport au premier cas et de 83% par rapport au second.

5 Simulation de jeu

Les mesures réalisées au niveau du *couvercle*, et les traitements effectués afin de compenser les effets de l'environnement sur ces données de mesure, ont permis d'obtenir une représentation de la *géométrie à l'état libre* de ce couvercle. Les cinq interfaces de l'*ensemble support* intervenant au niveau de l'assemblage du *couvercle* sur l'*ensemble support* ont également été mesurées. Il est alors possible de procéder à la simulation de l'assemblage des géométries mesurées de ces deux composants.

Les éléments décrits dans cette section ont également permis la rédaction d'un livrable dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*, fourni par l'entreprise *Airbus Group (Flexible gap simulation software for indirect gap measurement)*.

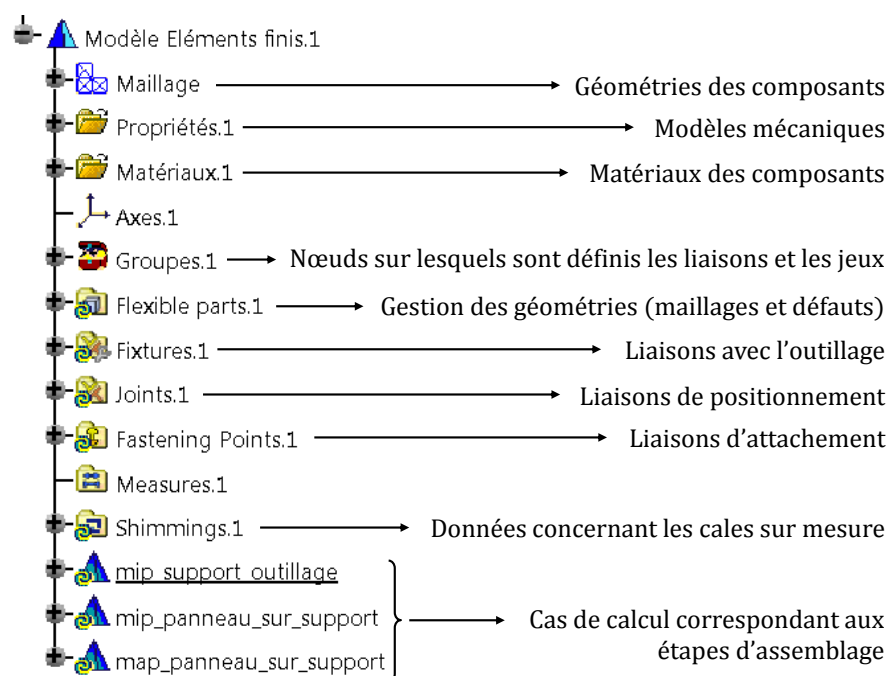


Figure 5.43 – Eléments nécessaires à la définition du modèle permettant la simulation d'assemblage dans l'environnement *AnaTolFlex*.

5.1 Modélisation de l'assemblage en vue de la simulation

Le logiciel *AnaTol* permet de réaliser l'analyse des tolérances au sein d'un mécanisme. Cette analyse repose sur une modélisation du produit similaire à celle représentée sur le *Graphe Orienté de Contact* visible sur la Figure 5.7. Les éléments géométriques intervenant au cours de l'assemblage sont définis par l'intermédiaire du modèleur *CAO*, ainsi que les liaisons entre ces éléments géométriques permettant de réaliser le produit. Les composants rigides subissent alors des mouvements de corps rigides, fonctions des variations géométriques introduites au niveau des éléments géométriques et des liaisons, et modélisées à l'aide de *Torseurs des Petits Déplacements*.

Dans le cadre de la simulation d'assemblage de composants flexibles, la définition du problème reste basée sur le même modèle du produit. La définition des éléments géométriques et des liaisons entre ces éléments est également nécessaire. L'environnement *AnaTolFlex* apporte cependant des éléments supplémentaires afin d'enrichir la modélisation du problème :

- ✈ La prise en compte de la géométrie variable des composants souples, fonction de l'environnement d'assemblage.
- ✈ L'introduction de défauts de forme à l'aide de modèles variationnels discrets au niveau des éléments géométriques des composants.
- ✈ La définition d'une séquence d'assemblage, qui permet de définir l'ordre des opérations (de positionnement, de fixation, d'évaluation de jeu, de changement d'orientation par rapport à la gravité).

Ces éléments sont visibles sur la Figure 5.43, qui représente les éléments définissant le modèle qui permettra la simulation d'assemblage. On retrouve les différents éléments qui sont présentés par la suite.

Le basculement vers l'environnement flexible nécessite donc de passer d'une géométrie continue définie par le modèle *CAO*, à une géométrie discrète définie par des maillages *Eléments Finis*. Cela permet de prendre en compte la flexibilité des composants. Chaque composant souple, ou présentant des défauts géométriques, est ainsi représenté par un maillage *Eléments Finis*. Les autres composants, considérés comme rigides et sans défauts géométriques, conservent leur représentation et n'apparaissent pas dans l'environne-

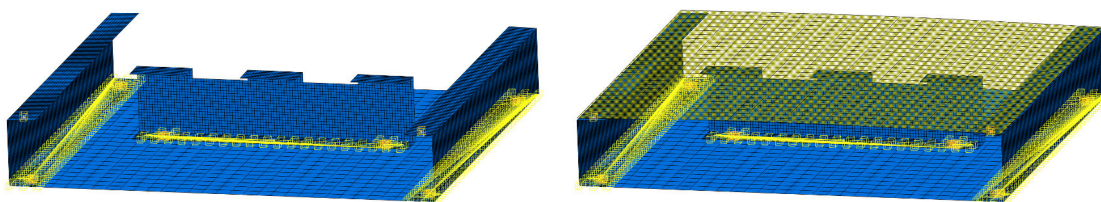


Figure 5.44 – Représentation des liaisons entre les éléments géométriques des composants, par l'intermédiaire des *spiders*, dans l'environnement *AnaTolFlex* (liaisons d'attachement non représentées).

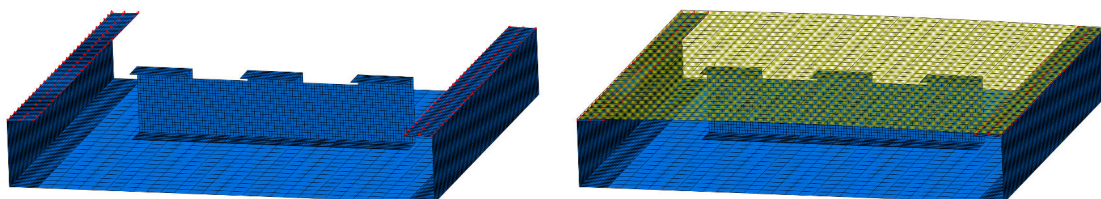


Figure 5.45 – Représentation des maillages de contact, illustrés sur les maillages avec défauts géométriques, dans l'environnement *AnaTolFlex*.

ment flexible. De la même manière que pour la simulation de comportement d'un composant, il est nécessaire de définir des propriétés de comportement et un matériau pour chaque composant.

Les défauts géométriques sont introduits au niveau des représentations *Eléments Finis* des composants, à partir de données de mesure ou de simulation. Une fonction intégrée à l'environnement *AnaTolFlex* permet de construire des champs d'écart représentatifs de ces défauts géométriques par rapport à la géométrie théorique discrétisée. Les travaux présentés dans le *Chapitre 3*, concernant la méthode d'association et de filtrage des données de mesure, ont notamment servis au développement de cette fonction.

Chaque élément géométrique des composants intervenant dans l'assemblage du produit est également représenté de manière discrète, par l'intermédiaire d'un ou plusieurs noeuds du maillage *Eléments Finis*. La sélection de ces noeuds est fonction de la nature de l'élément géométrique, et de la liaison qu'il permet de réaliser. La Figure 5.44 illustre les géométries discrètes utilisées, ainsi que les liaisons entre les composants. Les *spiders*, représentées en jaune, permettent de représenter les liaisons de positionnement. Elles permettent de lier les représentations discrètes des éléments géométriques des deux composants assemblés.

Concernant le contact unilatéral, un *maillage de contact*, visible sur la Figure 5.45, est construit entre les deux éléments géométriques discrets en contact. La condition de non interpénétration est traduite au niveau de ce maillage de contact afin que chaque *noeud esclave* d'un maillage ne puisse pas pénétrer une *facette maître* du maillage en vis-à-vis.

Enfin, la séquence d'assemblage est traduite, pour chaque phase d'assemblage, par un cas de calcul. Pour chacun de ces cas, et en fonction de la séquence définie, sont activées ou désactivées des liaisons entre les composants et des efforts tels que la gravité. Cela permet d'évaluer l'évolution de l'état géométrique du produit au cours de l'assemblage.

Cet outil de modélisation d'assemblage *AnaTolFlex* a été développé par l'entreprise *Airbus Group*, en collaboration avec le *LURPA*. En effet, le laboratoire a participé à l'élaboration du cahier des charges de l'outil logiciel, notamment concernant l'introduction de défauts géométriques à partir de données de mesure. De plus, dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*, le laboratoire est chargé de réaliser les premiers tests de l'outil afin de valider ses performances, en les confrontant au réel.

5.2 Simulation d'assemblage et évaluation du jeu simulé

AnaTolFlex est un pré-processeur qui traduit une gamme d'assemblage d'un produit, dont les éléments sont renseignés dans l'environnement du logiciel, en problème mécanique à résoudre à l'aide d'un code de calcul *Eléments Finis*. Afin de réaliser la simulation d'assemblage, et notamment de prendre un compte le contact unilatéral entre les composants, l'outil *AnaTolFlex* utilise les modules *SAMCEF Bacon* (pour le pré et post-processing *Eléments Finis*) et *SAMCEF Asef* (pour l'analyse statique linéaire). Chaque phase d'assemblage peut alors être simulée.

Pour chaque phase d'assemblage, il est possible d'évaluer l'état géométrique des composants assemblés. Cet état géométrique est représenté par des champs d'écarts, pour chaque composant, qui représentent l'évolution de la géométrie discrète du composant entre l'état initial et l'état assemblé à la phase courante. Il est possible d'observer sur la *Figure 5.46* l'état géométrique de l'assemblage simulé, correspondant à la phase de mise en position du *couvercle* sur l'*ensemble support* (phase n°1).

A partir des champs d'écarts qui définissent l'évolution géométrique des composants de l'assemblage, c'est-à-dire les déformées conséquences de cet assemblage, il est possible d'obtenir la géométrie des composants assemblés. L'étude de ces géométries permet alors d'étudier la configuration de contact entre les composants, afin de localiser les points de contact (« *hard points* »).

On observe sur la *Figure 5.46* que les contacts entre le *couvercle* et les *longerons* se font sur les arêtes de ces derniers. Cette disposition de contact paraît logique au vue de la configuration d'assemblage. Cependant elle est problématique dans le cadre de l'assemblage, car cela signifie qu'il n'y a aucun point de contact entre le *couvercle* et les *longerons* au niveau des trous de passage des éléments de fixation temporaires, qui sont situés au centre des longerons (à 25 mm du bord).

Il n'est donc pas possible de définir, comme prévu initialement, la séquence d'épingleage à partir des résultats de simulation. Cela vient du fait que les défauts géométriques des *longerons* sont relativement importants, puisqu'ils présentent un défaut angulaire de près de 3° (les faces supérieures des *longerons* ont tendance à s'ouvrir). De plus ce défaut s'oppose à la direction de la déformée du *couvercle* au niveau des *longerons*. On fixe ainsi arbitrairement la position des éléments de pré-assemblage en *G_2*, *G_34*, *D_34*, *D_1*, *G_10*, *G_20*, *G_25*, *G_30*, *D_25*, *D_20* et *D_12* (dans l'ordre de la séquence réalisée).

Après définition de ces nouveaux éléments dans l'environnement d'*AnaTolFlex*, il est alors possible de simuler l'opération suivante, qui correspond à la fixation du *couvercle* sur l'*ensemble support* à l'aide des éléments de pré-assemblage (phase n°2). Il est possible d'observer sur la *Figure 5.47* l'état géométrique de l'assemblage simulé correspondant.

Les données de simulation correspondant à l'état géométrique de l'opération de pré-assemblage sont récupérées. Elles vont permettre de définir la géométrie du jeu simulé. Il s'agit premièrement de récupérer les données correspondant aux éléments géométriques qui définissent les jeux, c'est à dire la face inférieure du *couvercle* (*C_1_S_1*) et les faces supérieures des *clips* (*Cl_1_S_1*, *Cl_2_S_1* et *Cl_3_S_1*). Il est alors possible de reconstruire des surfaces sur ces points, surfaces qui vont permettre de délimiter les jeux théoriques. Les résultats obtenus sont visibles sur les *Figures 5.48* et *5.49*. Les deux faces colorées représentent les faces inférieures et supérieures des jeux évalués. Les surfaces maillées non colorées représentent les faces supérieures théoriques des *clips* (situées à $Z = 119.6\text{mm}$). La face inférieure théorique du *couvercle* n'est pas représentée (située à $Z = 120\text{mm}$). Les jeux correspondant à la phase de mise en position sont présentés à titre d'information.

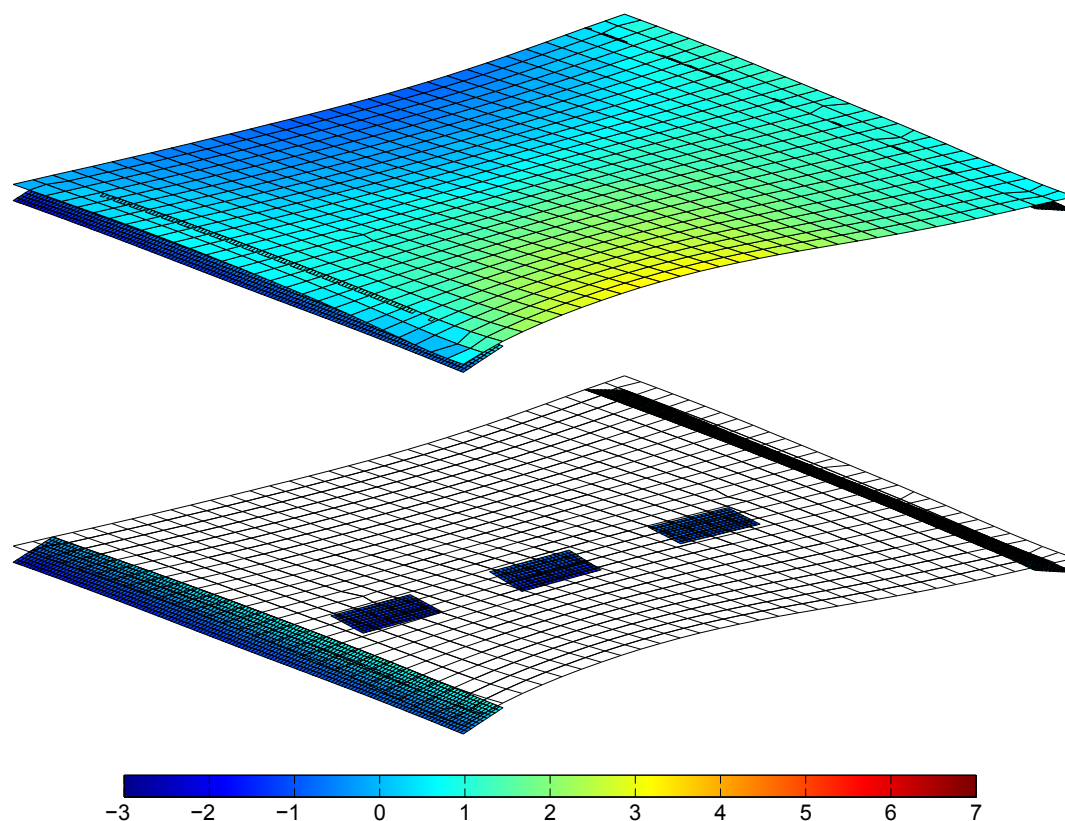


Figure 5.46 – Géométries correspondant à l'assemblage simulé de la phase de mise en position du *couvercle* sur l'*ensemble support* (phase n°1) (écarts en mm, amplitude facteur 10).

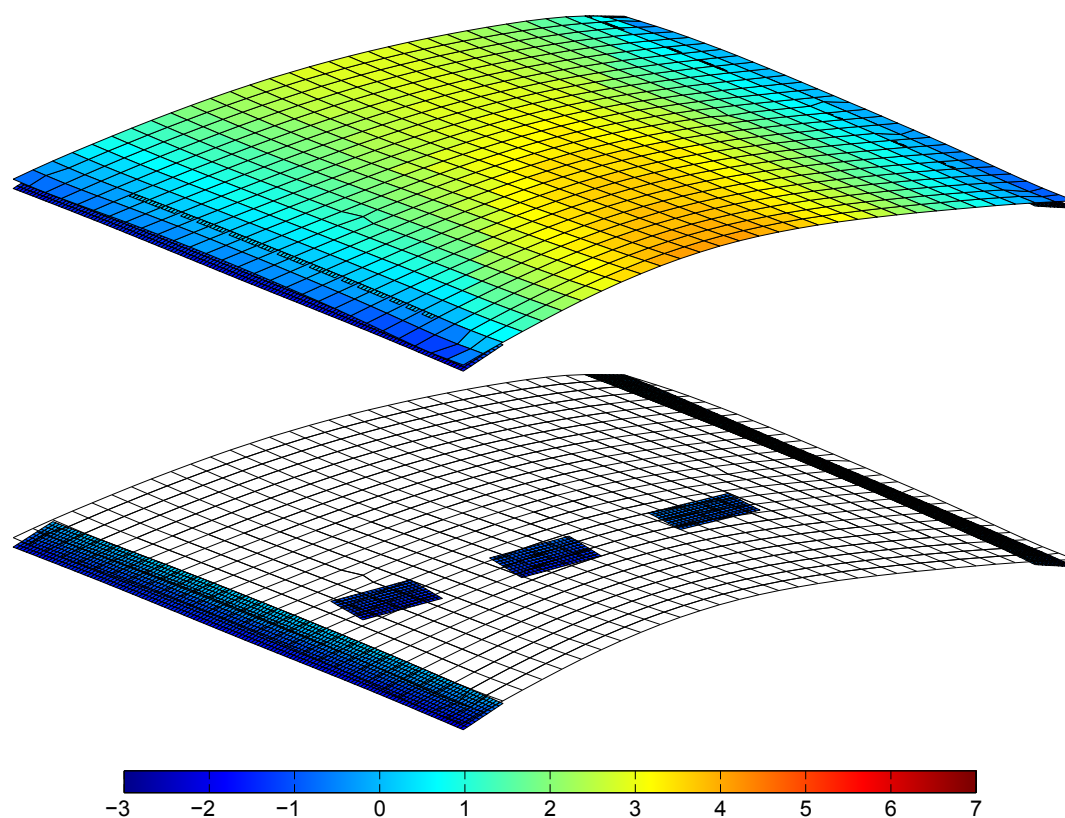


Figure 5.47 – Géométries correspondant à l'assemblage simulé de la phase de pré-assemblage du *couvercle* sur l'*ensemble support* (phase n°2) (écarts en mm, amplitude facteur 10).

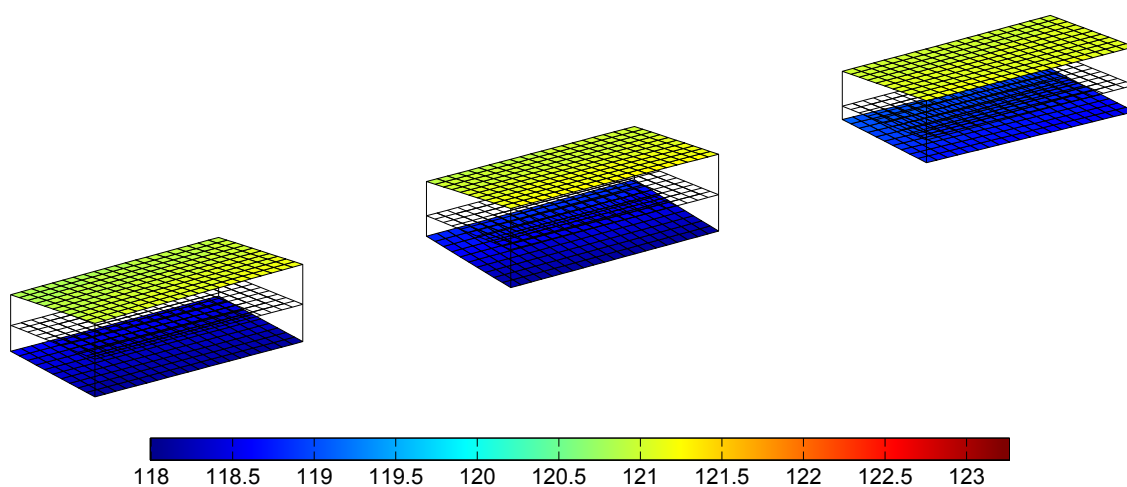


Figure 5.48 – Géométries correspondant aux jeux simulés lors de la phase de mise en position du *couvercle* sur l'*ensemble support* (phase n°1) (écarts en mm, amplitude facteur 10).

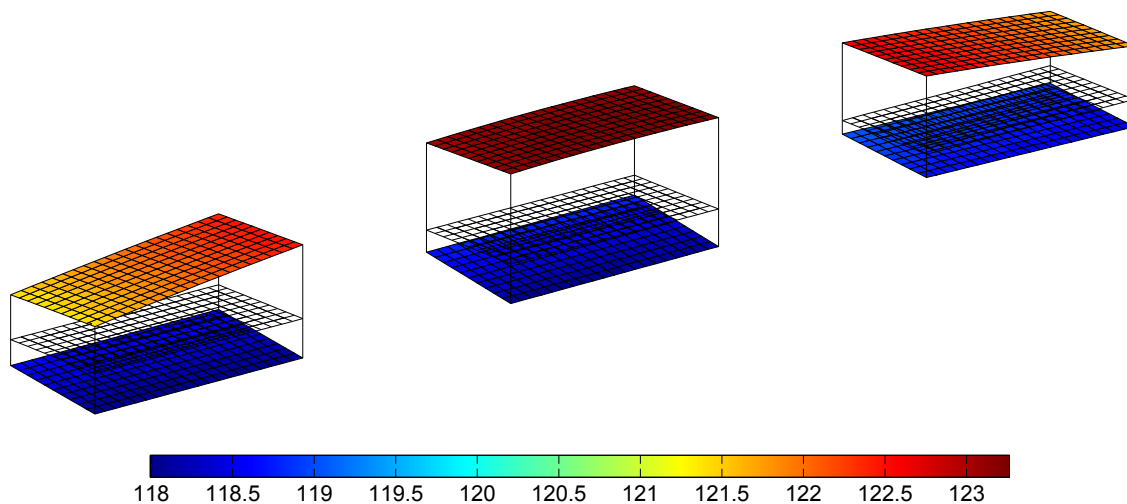


Figure 5.49 – Géométries correspondant aux jeux simulés lors de la phase de pré-assemblage du *couvercle* sur l'*ensemble support* (phase n°2) (écarts en mm, amplitude facteur 10).

5.3 Analyse des résultats

La première conclusion qu'on peut tirer concerne l'aspect visuel de l'assemblage simulé. Pour les deux phases d'assemblage, le *couvercle* est en contact au niveau des deux *longerons*. On retrouve également des traces de la géométrie à l'état libre évaluée. Le bombé, observé sur la *Figure 5.20* notamment, est plus important au niveau de la partie avant du *couvercle*, effet qui est également visible au niveau des deux phases d'assemblage. Enfin, lorsque la phase n°2 est réalisée, le *couvercle* tend à se bomber, ce qui est logique vu les défauts géométriques angulaires des faces supérieures des *longerons*, qui imposent la courbure de la déformée du *couvercle* lorsque celui-ci est plaqué sur les *longerons* par les éléments de pré-assemblage.

La valeur théorique des jeux entre le *couvercle* et les *clips* est de 0.4mm . La prise en compte des défauts géométriques et de la souplesse des composants modifie considérablement cette valeur. On constate ainsi des jeux variant de 2mm à 3mm dans l'état géométrique simulé correspondant à la phase n°1, et de 3.5mm à 5.5mm pour la phase n°2.

Ces résultats sont ainsi très différents de ceux qu'on obtiendrait sans l'évaluation de la *géométrie à l'état libre* proposée dans les *Sections 3 et 4*. La simulation d'assemblage à partir de la géométrie théorique dans la phase n°1 engendre notamment un contact sur le clip 2, ce qui modifie complètement la modélisation du problème, car il faut prévoir ce contact au niveau de la simulation. La simulation d'assemblage à partir de la *géométrie contrainte* mesurée, qui n'a pas été réalisée, engendrerait une géométrie différente du *couvercle* assemblé dans la phase n°1. Dans la phase n°2, lorsque le *couvercle* est pré-assemblé, l'écart risquerait d'être plus faible si le *couvercle* est amené au contact sur les *longerons*. Il en résulterait par contre des contraintes installées plus importantes.

Les contacts sont situés au niveau des arêtes des *longerons*. Il sont visibles sur les *Figures 5.46 et 5.47* car il y a une légère interpénétration entre les deux composants (de quelques centièmes de millimètre). L'effet est ainsi surtout visuel. Cela est dû à la légère déformation de l'*ensemble support* lors de l'assemblage, déformation intentionnellement non prise en compte dans la représentation, car l'hypothèse de rigidité de l'*ensemble support* posée va conditionner la comparaison au réel (hypothèse nécessaire pour les mesures de jeux mises en œuvre).

Enfin, on constate que les efforts de pré-assemblage simulés ne permettent pas d'amener le *couvercle* au contact avec les *longerons* dans la simulation. Cela est potentiellement problématique. En effet, on peut distinguer deux cas :

- Les efforts de pré-assemblage permettent d'amener le *couvercle* en contact avec les *longerons* au niveau de la zone d'influence de l'épingle de pré-assemblage. Dans ce cas il y a contact, et donc la valeur exacte de l'effort n'a pas d'influence sur l'état géométrique de l'assemblage. Il n'est donc pas nécessaire de la connaître tant qu'elle est suffisante pour assurer le contact.
- Les efforts de pré-assemblage ne permettent pas d'amener le *couvercle* en contact avec les *longerons* au niveau de la zone d'influence de l'épingle de pré-assemblage. Dans ce cas il n'y a pas contact, et donc la valeur exacte de l'effort a un impact sur l'état géométrique de l'assemblage. Il est alors nécessaire que cette valeur d'effort simulé corresponde à la valeur réelle de l'effort qui sera appliqué.

On se place donc dans le second cas. L'incertitude sur la valeur de l'effort imposé réellement par les épingles de pré-assemblage conditionnera en partie la validité du résultat obtenu.

La section suivante fait donc l'objet de l'assemblage expérimental, afin de permettre la confrontation des résultats de simulation au réel.

6 Assemblage expérimental et mesure du jeu

Cette section présente l'assemblage expérimental, ainsi que les mesures de jeux qui ont été réalisées, conformément aux conclusions tirées dans le *Chapitre 4*. La confrontation des résultats de mesure et de simulation est également effectuée, afin de conclure quant aux performances de l'outil de simulation.

Les travaux décrits dans cette section, et les résultats obtenus, représentent une des missions du laboratoire dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*.

6.1 Description de l'assemblage expérimental

Les deux phases d'assemblage, de mise en position du *couvercle* sur l'*ensemble support* (phase n°1), et de pré-assemblage du *couvercle* sur l'*ensemble support* à l'aide d'éléments de fixation temporaires (phase n°2), sont réalisées expérimentalement. Les photographies correspondant à ces deux phases sont visibles sur les *Figures 5.51* et *5.52*.

La réalisation de la phase n°1 ne pose pas de problème de mise en œuvre particulier. Concernant la phase n°2, il s'agit de mettre en place les épingles de pré-assemblage. Celles-ci, visibles sur la *Figure 5.52*, doivent être installées les unes après les autres. Il s'agit de les visser dans les trous prévus à cet effet, ce qui a pour conséquence l'écartement des deux tiges semi-coniques, et donc le plaquage des deux composants l'un par rapport à l'autre. Les épingles sont tarées à une certaine valeur d'effort, qui est conditionnée par le couple de serrage maximal qu'il est possible d'imposer. Ceci contribue au fait que l'incertitude sur la valeur de l'effort imposé peut être importante.

Afin de limiter cette incertitude, l'utilisation de masses pour plaquer le *couvercle* sur les *longerons* a été envisagée. En effet, la valeur de l'effort lié au poids des masses est plus facile à déterminer. Cela pose cependant des soucis de mise en œuvre. Il est tout d'abord nécessaire de positionner correctement ces masses au niveau des trous. Si les masses sont posées sur le *couvercle*, il y aura potentiellement des complications pour mesurer la face supérieure de celui-ci. En effet, plusieurs dizaines de kilogrammes, répartis sur les *longerons*, sont nécessaires afin de plaquer le *couvercle*. Accrocher les masses en dessous des *longerons* à l'aide d'un système adapté a été envisagé. Les problèmes sont alors liés à l'encombrement de ces masses au niveau de la partie inférieure du *couvercle*, et à la difficulté d'installation de ces masses dans un temps limité (problématique dans le cas de la mesure de jeu par prise d'empreinte).

L'utilisation de masses n'a pas été expérimentée du fait des contraintes temporelles liées au projet européen *LOCOMACHS*, mais elle représente une perspective très intéressante afin de faciliter la modélisation de l'environnement réel.

6.2 Evaluation du jeu

Lorsqu'une phase d'assemblage est réalisée, l'assemblage réel se trouve alors dans un état géométrique caractéristique de cette phase. Il s'agit alors d'évaluer le jeu entre les composants pour cet état géométrique donné. Les deux méthodes de mesure de jeu retenues ont été expérimentées. Il n'a cependant pas été possible de réaliser physiquement ces deux mesures *en même temps*. Cela signifie que chaque phase d'assemblage a été réalisée deux fois, afin de permettre la mise en œuvre de ces deux méthodes. On supposera ainsi que la répétabilité de chaque phase d'assemblage est suffisamment bonne afin de pouvoir comparer les deux mesures de jeux réalisées.



Figure 5.50 – *Ensemble support* seul avant assemblage.



Figure 5.51 – *Couvercle* mis en position sur l'*ensemble support* (phase n°1)



Figure 5.52 – *Couvercle* pré-assemblé sur l'*ensemble support* (phase n°2)

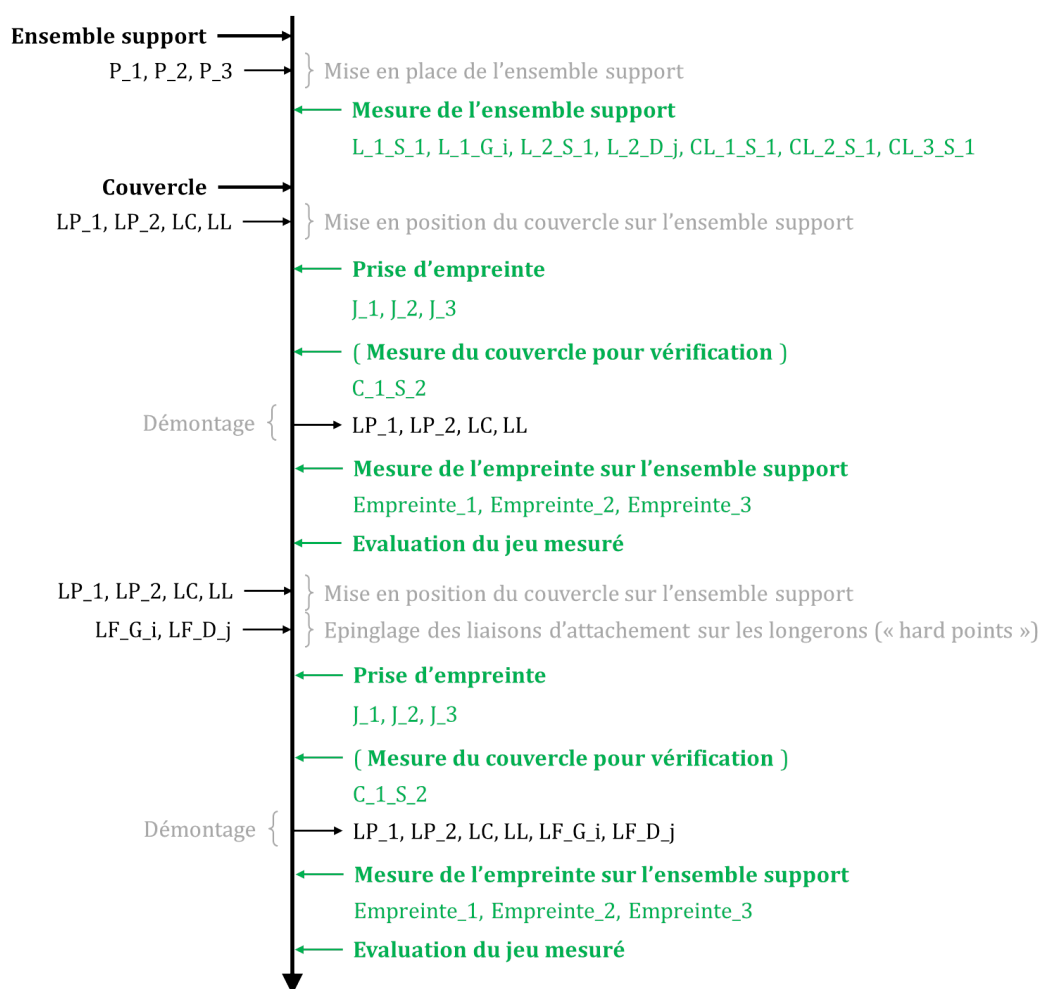


Figure 5.53 – Séquence d'assemblage pour la validation, intégrant les opérations de mesure de jeu par prise d'empreinte (phases n°1 et n°2).

6.2.1 Mesure par prise d'empreintes

Le protocole d'assemblage et de mesure réalisé dans le cas de la mesure par prise d'empreinte est schématisé sur la Figure 5.53. Les Figures 5.54, 5.55 et 5.56 permettent d'illustrer les différentes opérations d'assemblage réalisées et mesures effectuées. Ce protocole est le suivant :

- (1) Mise en place de l'ensemble support sur le marbre.
- (2) Mesure de l'ensemble support ($E_{ensemble\ support, mesuré}$). Il s'agit de mesurer les entités géométriques des longerons ($L_1_S_1$ et $L_2_S_1$) et des clips ($CL_1_S_1$, $CL_2_S_1$ et $CL_3_S_1$) avant l'assemblage. Les trous ($L_1_G_i$ et $L_2_D_j$) sont également mesurés lors de la numérisation des surfaces.
- (3) Réalisation de la phase d'assemblage n°1. Mise en position du couvercle sur l'ensemble support.
- (4) Prise d'empreinte des jeux correspondant à la phase n°1.
- (4') Mesure du couvercle assemblé en phase n°1 ($E_{couvercle\ phase\ n^{\circ}1, mesuré}$). Il s'agit de mesurer la face supérieure du couvercle ($C_1_S_2$) dans la configuration assemblée correspondant à la phase n°1.
- (5) Démontage du couvercle.
- (6) Mesure de l'empreinte sur l'ensemble support ($E_{empreinte\ sur\ support\ phase\ n^{\circ}1, mesuré}$). Il s'agit de numériser une nouvelle fois l'ensemble support mais avec les empreintes.
- (7) Evaluation des jeux par différence des mesures réalisées avant et après prise d'empreinte.
- Pour l'évaluation des jeux dans la phase n°2, il est nécessaire de réitérer les opérations (3) à (7).

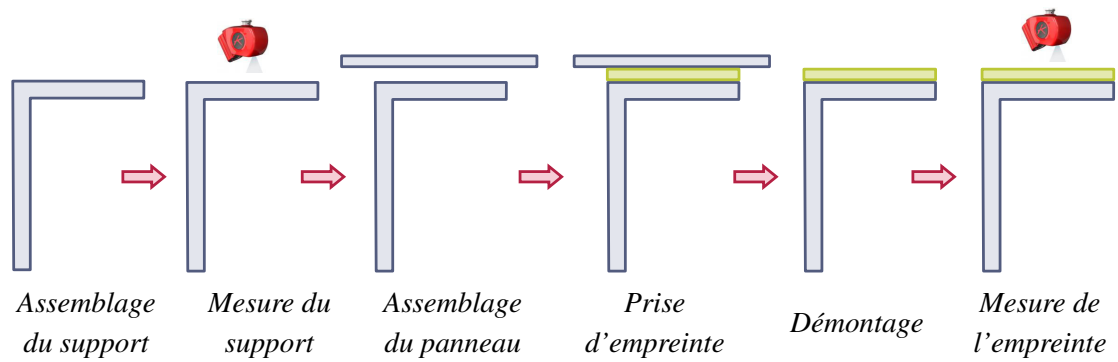


Figure 5.54 – Illustration de la méthode de mesure par prise d'empreinte directe puis mesure de l'empreinte sur l'un des composants.

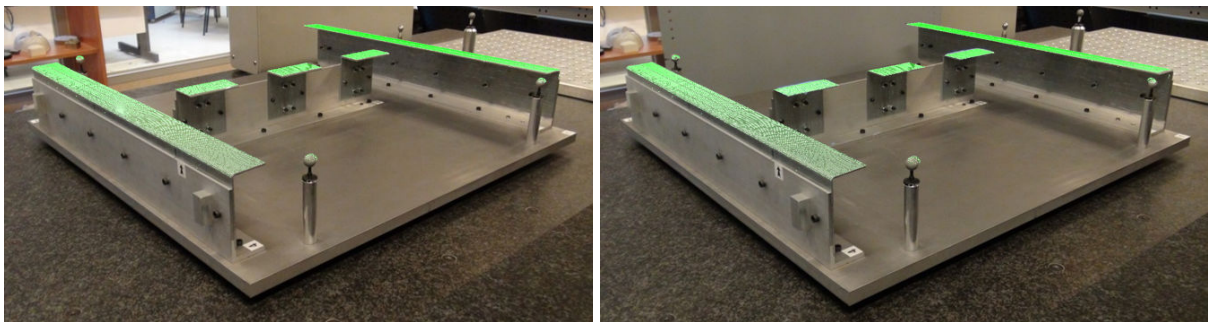


Figure 5.55 – Mesure de l'ensemble *support* avant l'assemblage et mesure des empreintes sur l'ensemble *support* après démontage du *couvercle* (illustré pour la phase n°1).

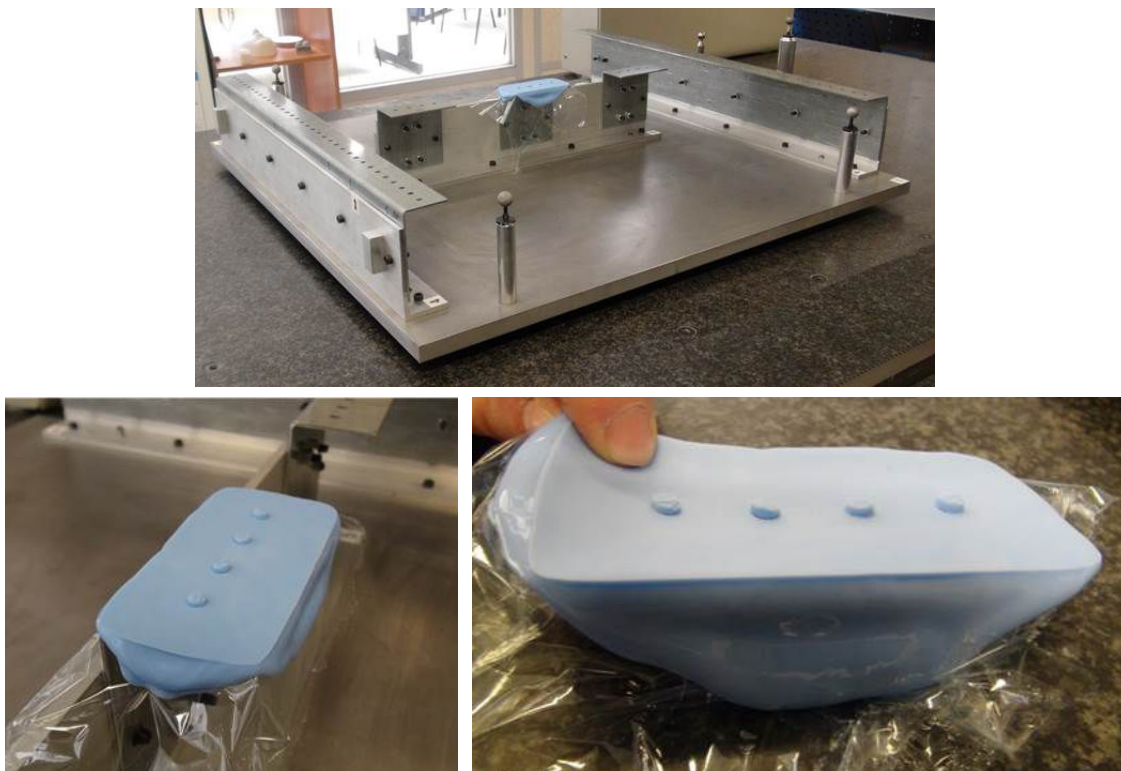


Figure 5.56 – Illustration de la méthode de prise d'empreinte.

A noter que pour chaque mesure réalisée, les trois sphères de référence sont également numérisées, afin de pouvoir réaliser le recalage des différentes mesures les unes par rapport aux autres. En effet, ces sphères sont accessibles pour la mesure quelle que soit la configuration d'assemblage, ce qui garantit l'utilisation des mêmes entités géométriques pour le recalage.

On observe que la procédure mise en œuvre est relativement complexe. En effet, de nombreuses opérations de mesure sont nécessaires afin de pouvoir réaliser l'évaluation du jeu. De plus il est nécessaire de démonter le *couvercle* entre chaque phase afin de pouvoir mesurer l'empreinte sur l'*ensemble support*. Le temps de prise de l'empreinte est également important (huit minutes). Tout ceci rend l'opération longue et fastidieuse.

Il y a en fait deux alternatives pour la prise d'empreinte. La première qui consiste à injecter la pâte après avoir réalisé l'assemblage. La seconde qui consiste à déposer la pâte sur l'un des composants, puis à réaliser l'assemblage. Les deux méthodes ont été testées. Il s'avère que la première permet de ne pas être contraint par le temps de polymérisation du produit, surtout si l'opération d'assemblage à réaliser est longue. Des problèmes d'accessibilité à la zone du jeu ou de viscosité de la pâte lorsque le jeu à mesurer est trop petit peuvent apparaître. La seconde méthode permet de s'affranchir de ces problèmes. Elle peut par contre impliquer une dépose de pâte trop importante. Il s'avère dans les faits que la seconde alternative offre de meilleurs résultats dans le cas présent.

Il est alors possible d'évaluer les jeux par différence entre la mesure de l'empreinte sur l'*ensemble support* et la mesure de l'*ensemble support*, ce qui correspond à :

$$E_{\text{jeu phase } n^{\circ}1, \text{mesuré}} = E_{\text{empreinte sur support phase } n^{\circ}1, \text{mesuré}} - E_{\text{ensemble support, mesuré}} \quad (5.16)$$

$$E_{\text{jeu phase } n^{\circ}2, \text{mesuré}} = E_{\text{empreinte sur support phase } n^{\circ}2, \text{mesuré}} - E_{\text{ensemble support, mesuré}} \quad (5.17)$$

Dans le cadre de la confrontation des deux méthodes d'évaluation de jeu mises en œuvre, il est également prévu de réaliser une mesure de la face supérieure du *couvercle* après la prise d'empreinte (4'). Celle-ci n'intervient pas dans la procédure classique d'évaluation de jeu par prise d'empreinte, mais elle doit permettre de vérifier si l'état géométrique du *couvercle* est modifié par la présence de cette empreinte.

Il s'avère que les écarts entre les mesures du *couvercle* réalisées avant et après la prise d'empreinte sont relativement importantes. Dans le cas de la phase d'assemblage n°1, il y a un écart maximal qui atteint 2mm. Dans le cas de la phase n°2, cet écart atteint 0.7mm. De plus, des photographies ont été réalisées avant et après la prise d'empreinte, l'appareil étant resté fixe. On observe visuellement la modification de géométrie de la forme réelle du *couvercle*.

Ceci tend donc à exclure le choix de cette méthode afin de mesurer les jeux dans ce cadre précis. Pour un assemblage dont les composants sont moins souples, et où la configuration d'assemblage est moins sensible, l'utilisation de cette pâte pourrait convenir. Par exemple la mesure de jeu au niveau des *longerons* lors de la phase n°2 pourrait sûrement être réalisée avec ce matériau sans modification significative de l'état géométrique de l'assemblage.

6.2.2 Mesure par différence

Le protocole d'assemblage et de mesure réalisé dans le cas de la mesure par différence est schématisé sur la Figure 5.57. Les Figures 5.58 et 5.59 permettent d'illustrer les différentes opérations réalisées et mesures effectuées. Ce protocole est le suivant :

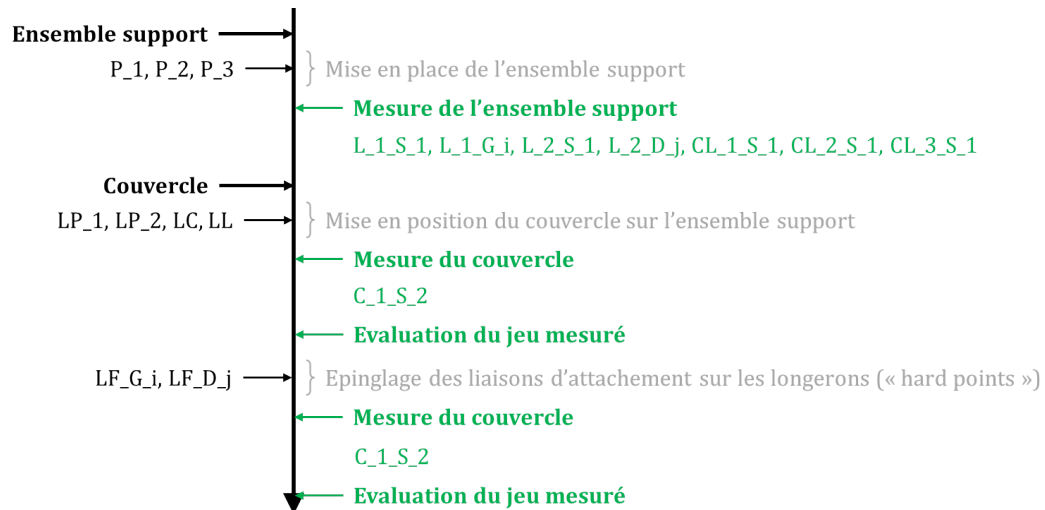


Figure 5.57 – Séquence d'assemblage pour la validation, intégrant les opérations de mesure de jeu par différence (phases n°1 et n°2).

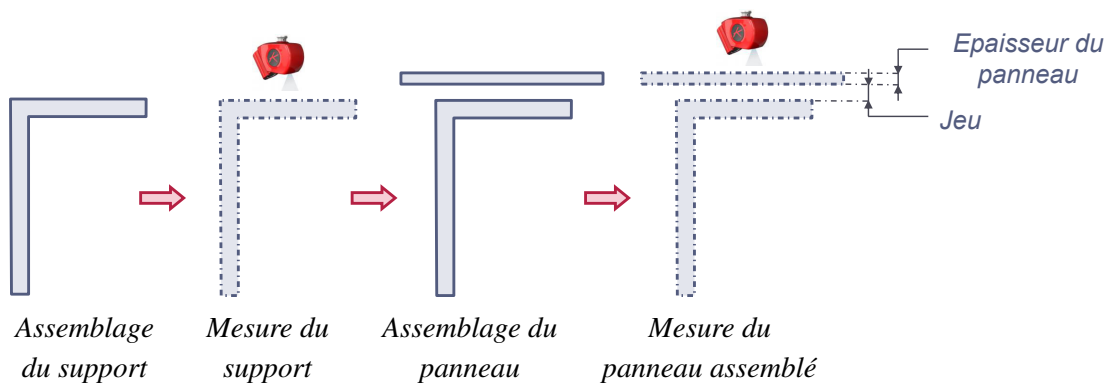


Figure 5.58 – Illustration de la méthode de mesure indirecte par différence.

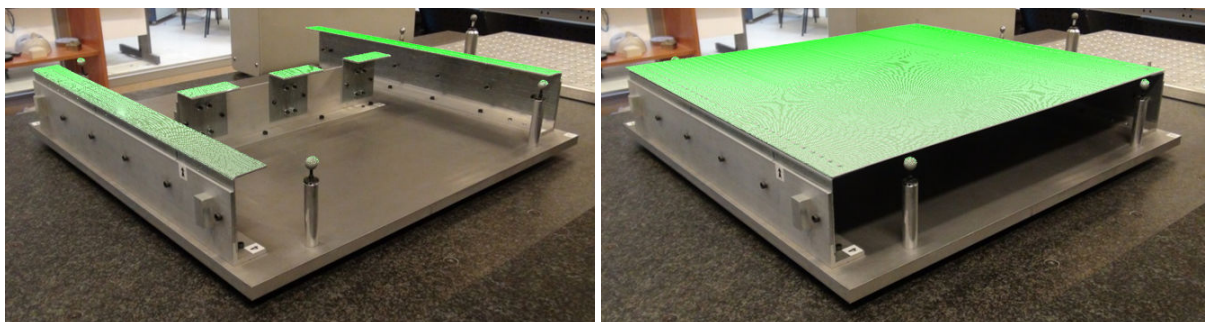


Figure 5.59 – Mesure de l'ensemble support avant l'assemblage et mesure du couvercle assemblé (illustré pour la phase n°1).

- (1) Mise en place de l'*ensemble support* sur le marbre.
- (2) Mesure de l'*ensemble support* ($E_{ensemble\ support,mesuré}$). Il s'agit de mesurer les entités géométriques des *longerons* ($L_1_S_1$ et $L_2_S_1$) et des *clips* ($Cl_1_S_1$, $Cl_2_S_1$ et $Cl_3_S_1$) avant l'assemblage. Les trous ($L_1_G_i$ et $L_2_D_j$) sont également mesurés lors de la numérisation des surfaces.
- (3) Réalisation de la phase d'assemblage n°1. Mise en position du *couvercle* sur l'*ensemble support*.
- (4) Mesure du *couvercle* assemblé en phase n°1 ($E_{couvercle\ phase\ n^{\circ}1,mesuré}$). Il s'agit de mesurer la face supérieure du couvercle ($C_1_S_2$) dans la configuration assemblée correspondant à la phase n°1.
- (5) Evaluation des jeux par différence des mesures réalisées sur le *couvercle* en phase n°1 et l'*ensemble support*.
- (3') Réalisation de la phase d'assemblage n°2. Pré-assemblage du *couvercle* sur l'*ensemble support*.
- (4') Mesure du *couvercle* assemblé en phase n°2 ($E_{couvercle\ phase\ n^{\circ}2,mesuré}$). Il s'agit de mesurer la face supérieure du couvercle ($C_1_S_2$) dans la configuration assemblée correspondant à la phase n°2.
- (5') Evaluation des jeux par différence des mesures réalisées sur le *couvercle* en phase n°2 et l'*ensemble support*.

Comme précédemment, pour chaque mesure réalisée, les trois sphères de référence sont également numérisées, afin de pouvoir réaliser le recalage des différentes mesures les unes par rapport aux autres.

Cette méthode est bien plus simple à mettre en œuvre. Elle nécessite autant d'acquisitions de la géométrie des composants. Cependant il n'y a pas d'opérations fastidieuses comme la prise d'empreinte. Il n'y a pas non plus besoin de démonter les composants afin d'accéder à l'empreinte. Les deux phases peuvent s'enchaîner directement.

Il est alors possible d'évaluer les jeux par différence entre la mesure du *couvercle* et la mesure de l'*ensemble support*, en tenant compte de l'épaisseur du *couvercle*, ce qui correspond à :

$$E_{jeu\ phase\ n^{\circ}1,mesuré} = E_{couvercle\ phase\ n^{\circ}1,mesuré} - Epaisseur_{couvercle} - E_{ensemble\ support,mesuré} \quad (5.18)$$

$$E_{jeu\ phase\ n^{\circ}2,mesuré} = E_{couvercle\ phase\ n^{\circ}2,mesuré} - Epaisseur_{couvercle} - E_{ensemble\ support,mesuré} \quad (5.19)$$

Les résultats obtenus à l'aide de cette méthode sont analysés dans la section suivante, et comparés aux jeux évalués par la simulation.

A noter que la répétabilité de la mesure de jeu à l'aide de cette méthode n'a pas été étudiée. Il serait intéressant d'étudier si les incertitudes liées à la mesure des différentes géométries, à la réalisation de l'assemblage réel et à l'évaluation du jeu sont suffisamment faible pour limiter les variations sur le jeu évalué.

6.3 Analyse des résultats

Les géométries des composants évaluées par la mesure, et correspondant aux états géométriques de l'assemblage observés dans les deux phases, sont visibles sur les *Figures 5.60* et *5.61*. Les jeux évalués à partir de ces mesures par la méthode par différence sont visibles sur les *Figures 5.62* et *5.63*.

Tout d'abord, les formes mesurées du *couvercle* dans les deux phases sont cohérentes avec ce qui est observé. Le *couvercle* semble bien en contact au niveau des deux *longerons*. On observe un bombé plus important sur la partie avant du couvercle, ce qui est représentatif de la *géométrie à l'état libre* évaluée.

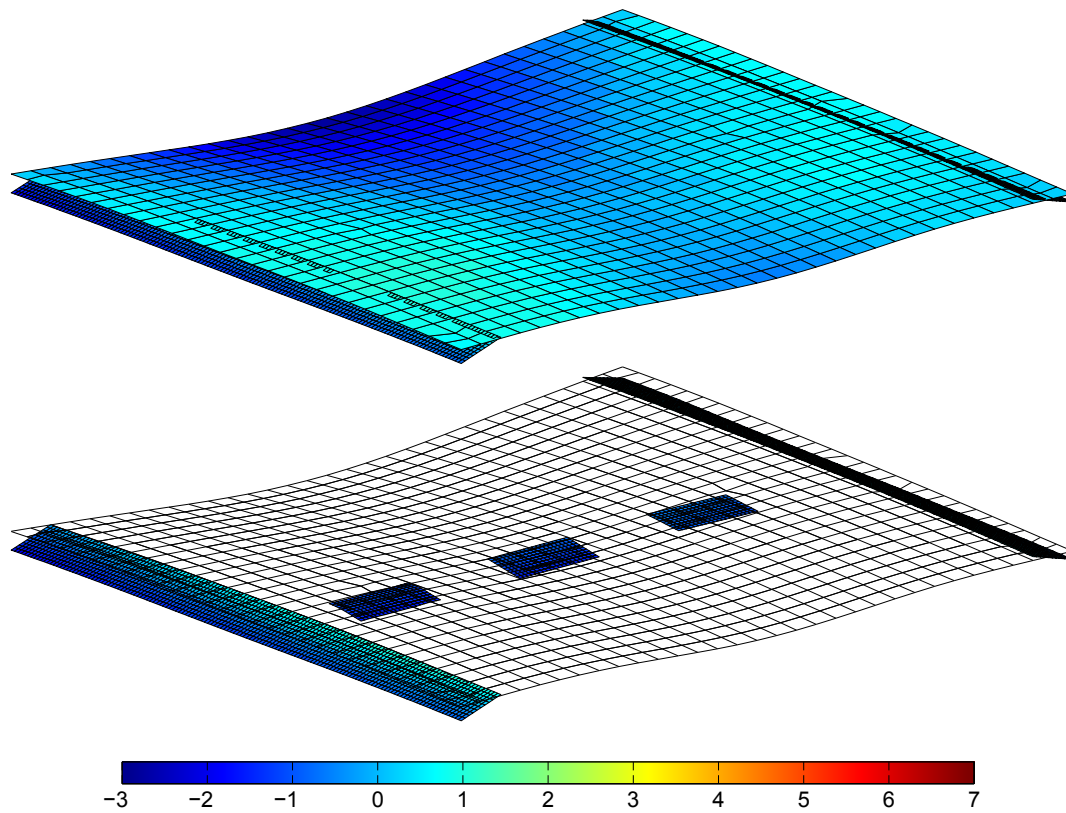


Figure 5.60 – Géométries correspondant à la mesure de l'assemblage en phase de mise en position du couvercle sur l'ensemble support (phase n°1) (écarts en mm, amplitude facteur 10).

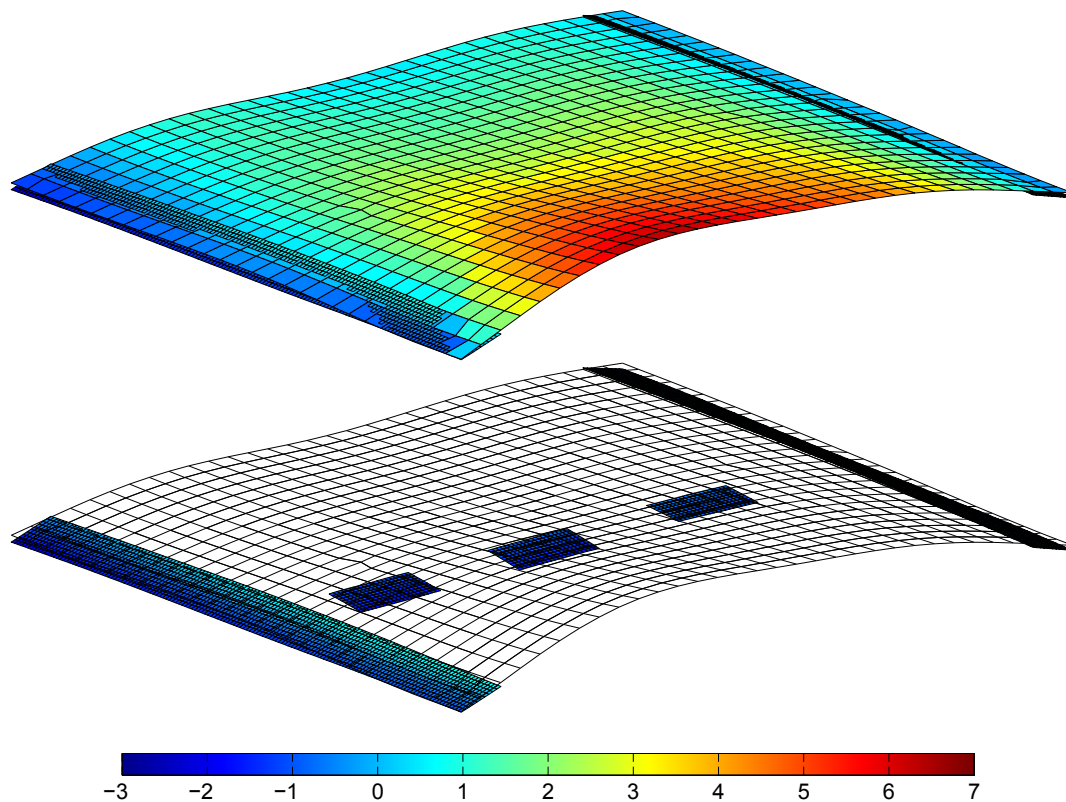


Figure 5.61 – Géométries correspondant à la mesure de l'assemblage en phase de pré-assemblage du couvercle sur l'ensemble support (phase n°2) (écarts en mm, amplitude facteur 10).

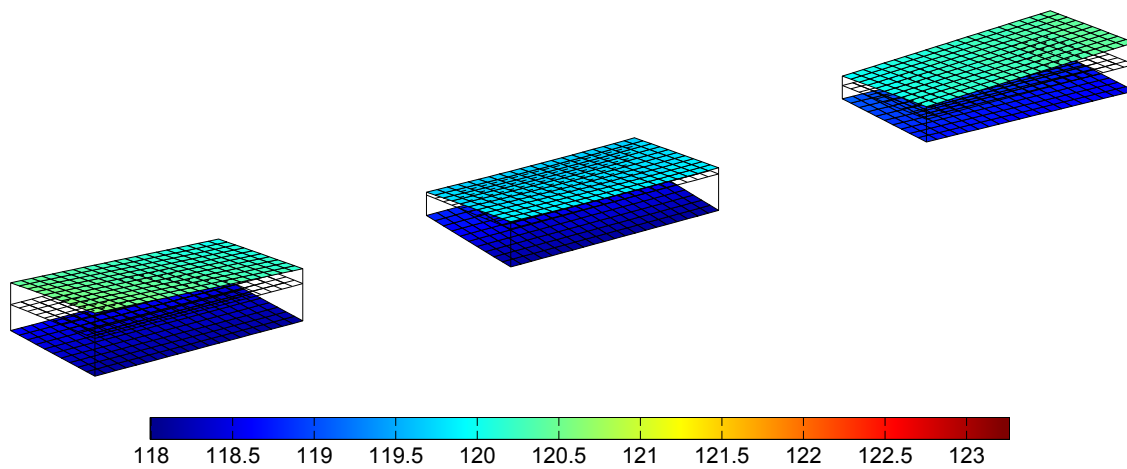


Figure 5.62 – Géométries correspondant aux jeux mesurés lors de la phase de mise en position du *couvercle* sur l'ensemble *support* (phase n°1) (écarts en mm, amplitude facteur 10).

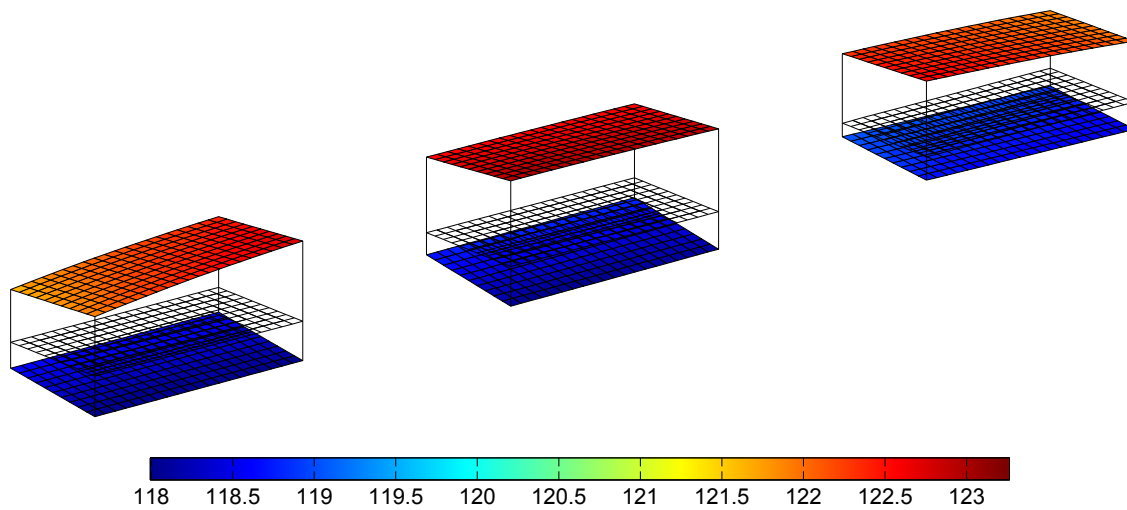


Figure 5.63 – Géométries correspondant aux jeux mesurés lors de la phase de pré-assemblage du *couvercle* sur l'ensemble *support* (phase n°2) (écarts en mm, amplitude facteur 10).

On note cependant une interpénétration parfois importante au niveau des *longerons*. Dans les deux phases cette interpénétration est limitée au niveau du *longeron* gauche (0.03mm pour la phase n°1, 0.2mm pour la phase n°2), mais beaucoup plus importante au niveau du *longeron* droit (0.4mm pour la phase n°1, 0.2mm pour la phase n°2). Cette interpénétration s'explique d'une part par la non prise en compte des défauts de positionnement des deux *longerons* l'un par rapport à l'autre. En effet, seuls les défauts géométriques suivant l'axe Z sont considérés. Ainsi les mesures du *couvercle* sont recalées correctement par rapport au *longeron* gauche qui sert de référence pour la première mesure, d'où le contact cohérent. Les *longerons* étant dans la réalité légèrement plus écartés, la représentation choisie ne permet pas de le prendre en compte, et génère une interpénétration.

Pour la phase n°2, on observe un phénomène d'oscillation sur la partie avant du *couvercle*. En effet, au niveau des contacts avec les *longerons* sur cette partie avant, il semblerait que le *couvercle* passe d'une forte interpénétration (0.2mm) à un décollement (0.2mm). A cela s'ajoute un bombé sur la partie avant qui ne semble pas naturel. Ces indices laissent supposer que des contraintes non négligeables sont installées lors de la réalisation de la phase n°2 de pré-assemblage.

Des essais ont été réalisés après l'analyse de ces résultats, afin d'isoler la cause de ce phénomène. A l'aide de comparateurs positionnés au niveau des *longerons*, il a été montré que lors de cette phase n°2 d'assemblage, les *longerons* subissent des déformées qui sont non-négligeables, c'est à dire de l'ordre 0.3mm à 0.4mm. Ceci explique ainsi la forte interpénétration constatée dans cette phase, car l'hypothèse de support rigide n'est plus tout à fait respectée. Difficile toute fois de prendre cette déformée en compte dans la simulation sans en avoir isolé la cause.

Toujours sous la présence des comparateurs, la séquence de pré-assemblage a été répétée afin d'isoler la cause de cette déformée. Elle a permis de montrer que malgré le contre-perçage des trous des éléments de l'ensemble support, censé absorber les variations géométriques et permettre un assemblage des composants libre de contraintes, les trous du *couvercle* et de l'ensemble support ne sont pas suffisamment bien positionnés les uns par rapport aux autres. Ce défaut, de l'ordre de plusieurs dixièmes, permet toutefois l'insertion des éléments de fixation temporaire. Seulement lors du serrage de ces fixations, et notamment de la quatrième épingle de pré-assemblage en D_2, les *longerons* se déforment. La conséquence sur le *couvercle* est de l'ordre de 0.7mm localement au niveau de la partie avant.

Pour rappel la valeur théorique des jeux entre le *couvercle* et les *clips* est de 0.4mm. Celle constatée par la mesure varie de 1mm à 2.5mm dans l'état géométrique simulé correspondant à la phase n°1, et de 3mm à 5.5mm pour la phase n°2. Les jeux mesurés ont ainsi tendance logiquement à augmenter entre la phase n°1 et la phase n°2.

6.4 Comparaison des jeux simulés et mesurés

Tout d'abord la comparaison des états géométriques, illustrés sur les Figures 5.46, 5.47, 5.60 et 5.61, montre que le *couvercle* a tendance à se comporter de façon similaire dans les environnements réels et de simulation. La différence de forme observable provient de la déformée. Celle-ci est différente dans l'environnement réel pour deux raisons majeures. Premièrement les défauts de positionnement des *longerons* l'un par rapport à l'autre ne sont pas pris en compte dans la simulation, ce qui fait que la distance considérée entre les arêtes des *longerons* est plus petite. Donc la déformée simulée est moins importante que la déformée réelle. Deuxièmement, malgré le recalage des paramètres matériau effectué, les comportements réels et simulés sont différents. Et ceci influe sur la déformée également. Cet aspect est présent, mais moins important en phase n°2, car la déformée est principalement orientée par la fixation du *couvercle* sur les *longerons*.

La comparaison des géométries des jeux, illustrés sur les Figures 5.48, 5.49, 5.62 et 5.63, souligne une tendance similaire d'augmentation des jeux lors du pré-assemblage (phase n°2). La forme des jeux

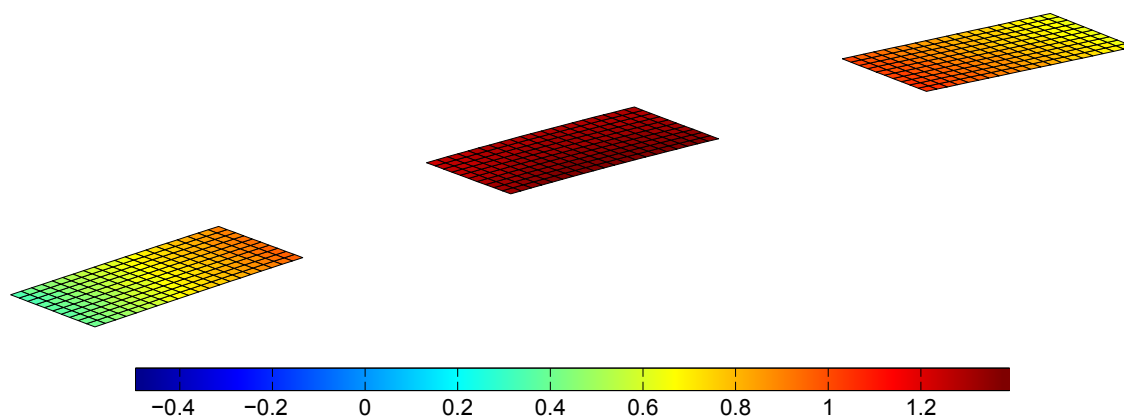


Figure 5.64 – Différences des jeux simulés et mesurés lors de la phase de mise en position du *couvercle* sur l'ensemble support (phase n°1) (écarts en mm, amplitude facteur 10).

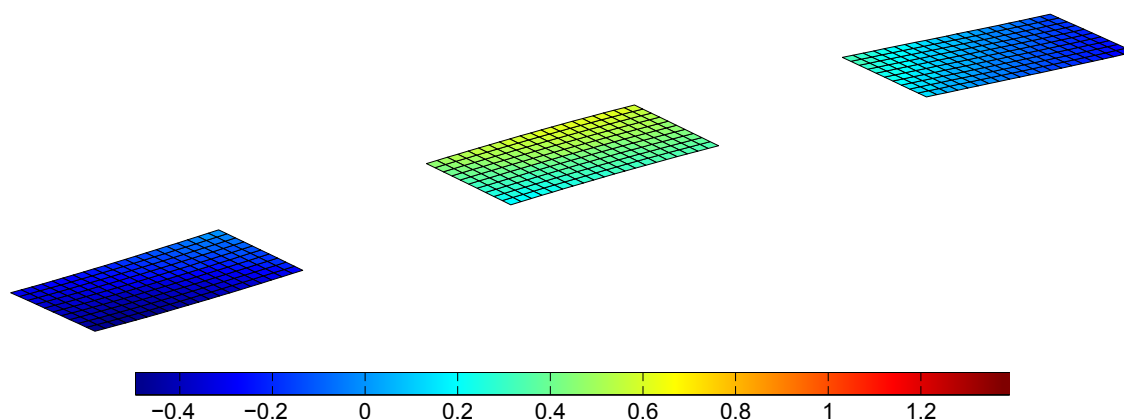


Figure 5.65 – Différences des jeux simulés et mesurés lors de la phase de pré-assemblage du *couvercle* sur l'ensemble support (phase n°2) (écarts en mm, amplitude facteur 10).

correspondant à la phase n°1 vient également souligner les effets liés à la différence des déformées mesurée et simulée du *couvercle*.

Les Figures 5.64 et 5.65 illustrent les écarts entre les jeux simulés et mesurés, pour les deux phases d'assemblage. Dans le cas présent de l'assemblage d'un composant souple sur un composant considéré comme rigide, la seule comparaison des valeurs des jeux est suffisante pour tirer des conclusions (la géométrie des *clips*, qui est la référence, est en effet constante). Dans le cas d'un jeu évalué entre deux composants souples, il serait également nécessaire d'étudier la position de ce jeu dans l'espace, fonction de l'état géométrique du composant sur lequel il est défini. Le problème de relative souplesse des *longerons* lors de l'évaluation du jeu dans la phase n°2 n'a pas d'impact sur la géométrie des *clips*.

Il est ainsi possible de constater que les écarts entre les résultats de simulation et de mesure de jeu sont plus importants pour la phase d'assemblage n°1. Dans les deux cas les écarts sont plus importants au niveau du clip 2, ce qui paraît cohérent car c'est celui qui est le plus éloigné des conditions aux limites. L'influence de l'erreur sur l'évaluation de la déformée est ainsi plus grande dans cette zone. On constate pour la phase n°1 un écart de l'ordre de 0.7mm en moyenne au niveau du clip 1, de 1.4mm au niveau du clip 2, et de 0.8mm au niveau du clip 3. Pour la phase n°2 l'écart est de l'ordre de -0.2mm en moyenne au niveau du clip 1, de 0.4mm au niveau du clip 2, et de -0.1mm au niveau du clip 3. Le changement de signe des écarts au niveau des clips 1 et 3 pour la phase n°2 est conséquence du phénomène observé lors de l'assemblage réel.

L'analyse relative des écarts au niveau du clip 2 permet de conclure quant à un écart entre les jeux simulés

et mesurés, relatif à la dimension moyenne du jeu mesuré, de l'ordre de 50% pour la phase n°1, et de l'ordre de 10% pour la phase n°2. Ceci s'explique principalement par la sensibilité du couvercle à l'environnement lorsque celui-ci est peu contraint. En effet, la différence de déformées constatées est principalement liée au modèle mécanique, et un peu aux défauts de position des *longerons*. Dans la phase n°2, la responsabilité du modèle mécanique est beaucoup moins importante, puisque c'est cette fois-ci principalement l'ouverture des longerons qui impose la déformée. D'où les écarts relatifs plus faibles.

Il est ainsi nécessaire de trouver le bon compromis. En effet, moins un composant souple est contraint, et plus le comportement mécanique aura d'effet sur sa géométrie. Inversement plus un composant souple est contraint, moins ce comportement mécanique aura d'influence sur sa géométrie, mais plus les éléments géométriques ou mécaniques auront d'influence sur celle-ci. Il sera alors nécessaire d'identifier ces éléments avec précision.

7 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter la procédure de validation expérimentale mise en œuvre afin de confronter les jeux obtenus par la simulation et par la mesure. Un support expérimental, fortement inspiré des structures aéronautiques actuelles, et représentatif des problématiques concernant le calage, a été conçu dans le but de permettre cette confrontation. Un scénario d'assemblage typiquement industriel a été imaginé afin de réaliser cette procédure de validation.

L'évaluation des caractéristiques géométriques des composants, rigides et flexibles, nécessaire à la simulation d'assemblage, a été réalisée conformément à ce qui est détaillé dans le *Chapitre 3*. Deux méthodes de validation de cette évaluation sur le composant souple ont été mises en œuvre. La méthode consistant à comparer deux *géométries à l'état libre* obtenues à partir de deux mesures dans des configurations différentes, et de deux compensations des effets de l'environnement correspondantes, ne permet pas de conclure quant à la cause des écarts observés entre les deux géométries. La méthode qui consiste à comparer la *géométrie à l'état libre* obtenue à une *géométrie à l'état libre* évaluée par retournement permet d'obtenir un résultat plus facile à analyser. Cette géométrie étant évaluée seulement par la mesure, elle offre plus de garanties, la modélisation du réel étant le point faible de la méthode de compensation des effets de l'environnement.

Une analyse de sensibilité est réalisée afin d'étudier l'influence des différents paramètres sur le résultat de la méthode. A partir d'une sélection des paramètres étant jugés les plus influents, l'étude de sensibilité au niveau de l'acquisition et du traitement, et au niveau du recalage non-rigide, est menée. Elle permet notamment de mettre en avant les effets de la thermique sur le capteur *LASER*, et le recalage rigide, comme les causes potentielles de variations de la géométrie mesurée les plus importantes. Elle montre également que la déformée est sensible aux perturbations extérieures lorsque le composant est peu contraint, et que dans ce cas le modèle mécanique conditionne principalement la déformée simulée.

Deux méthodes permettant de recalibrer les paramètres matériau ont été expérimentées. L'une d'elle, basée sur l'analyse modale des écarts entre la *géométrie à l'état libre* obtenue initialement, et la *géométrie à l'état libre* obtenue par retournement, a montré qu'il est possible d'améliorer la modélisation en corrigeant les paramètres correspondant aux modes utilisés pour l'analyse. Celle-ci nécessite cependant une expertise préliminaire afin de définir les paramètres qui peuvent avoir une influence sur les écarts constatés.

Les expérimentations réalisées, et les résultats obtenus, ont permis de définir un cadre de mise en œuvre de la méthode présentée dans le *Chapitre 3*. Celui-ci préconise ainsi principalement le choix d'une configuration de mesure garantissant à la fois la stabilité du composant et une limitation de la sensibilité aux perturbations. La modélisation du réel est la clé de la performance de la méthode. Cela passe par l'évaluation de la position des conditions aux limites réelles, et également de leur nature. Cela passe aussi par l'identification

du comportement mécanique, qui est dans le cas d'un composant peu contraint, l'élément primordial pour garantir l'évaluation de sa *géométrie à l'état libre* par compensation des effets de l'environnement.

Une fois les géométries des composants évaluées, il est possible de réaliser la simulation d'assemblage de ces géométries. L'outil logiciel *AnaTolFlex* est ainsi utilisé afin d'évaluer par la simulation, à partir des mesures réalisées, et des paramètres matériau identifiés, l'état géométrique des composants assemblés. Les jeux au niveau des *clips* sont ainsi évalués à partir de ces résultats de simulation. Cette procédure a permis la rédaction d'un livrable dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*.

L'assemblage physique est réalisé en parallèle, suivant le scénario défini. Les deux méthodes de mesure retenues au *Chapitre 4* ont été mises en œuvre pour chacune des phases d'assemblage. La méthode par prise d'empreinte a montré ses limites dans le cadre de la mesure de jeu dans un assemblage de composants souples, puisque sa présence modifie l'état géométrique de celui-ci. Elle reste toutefois une alternative intéressante puisqu'elle permet d'avoir accès directement à la zone du jeu. La méthode par différence a ainsi permis d'évaluer par la mesure les jeux au niveau des *clips*.

Les jeux mesurés et simulés sont comparés, pour chacune des phases. Les résultats montrent qu'il est plus difficile d'évaluer par la simulation l'état géométrique de l'assemblage lorsque les composants sont peu contraints, car le modèle mécanique retenu conditionne grandement le résultat obtenu. Lorsque les composants sont très contraints, l'influence du modèle mécanique est réduite, et les écarts entre les états géométriques mesuré et simulé sont réduits. Les erreurs commises concernant la modélisation géométrique prennent alors une part beaucoup plus importante. Les résultats obtenus sont satisfaisant dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*, car ils permettent de valider le recours à l'outil *AnaTolFlex*. D'autant plus que des pistes sont à l'étude afin d'améliorer d'une part la mise en œuvre expérimentale de la phase n°2, et d'autre part la modélisation du comportement mécanique du *couvercle*, afin d'améliorer les résultats de validation.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit sont en lien direct avec le domaine industriel aéronautique. Ils concernent plus particulièrement les opérations d'*assemblage de structures aéronautiques*, qui représentent à l'heure actuelle des coûts importants pour les industriels. Les grandes dimensions, les défauts géométriques et la souplesse des composants rendent le processus d'assemblage relativement complexe. L'amélioration des opérations d'assemblage passe notamment par l'enrichissement par la mesure des modèles utilisés pour la simulation d'assemblage de composants souples, que ce soit au niveau géométrique ou mécanique.

Il est ainsi nécessaire de définir ce qui caractérise un assemblage de composants souples dans le contexte aéronautique. Le jeu est l'exigence principale à respecter au niveau de l'opération de pré-assemblage. Celui-ci est propre à un état géométrique donné de l'assemblage, qui dépend de la géométrie des composants, de leur comportement mécanique, et des liaisons entre les composants. L'utilisation de *champs d'écarts* permet de caractériser les différents écarts géométriques intervenant dans le processus, que ce soit pour représenter au niveau du composant une géométrie avec défauts par rapport à une géométrie de référence, ou les effets d'un changement d'état géométrique, ou que ce soit pour représenter les écarts géométriques transmis au niveau des liaisons entre les composants. L'étude du processus de simulation d'assemblage flexible, et du processus de validation par la mesure de jeu, a souligné les contraintes de représentation des différents écarts géométriques liées aux environnements de la conception, de la simulation et de la mesure.

L'évaluation par la mesure de caractéristiques géométriques et mécaniques sur des composants souples est au centre des travaux présentés dans ce manuscrit. Le choix est fait d'utiliser une méthode qui consiste à réaliser une acquisition de la géométrie du composant, dans sa configuration de mesure, et à compenser par simulation les effets de l'environnement sur le composant, afin d'évaluer sa *géométrie à l'état libre*. Cette méthode offre des perspectives intéressantes dans le domaine de la simulation d'assemblage aéronautique, car les composants peuvent présenter des défauts géométriques et des déformées importantes. La non-prise en compte des défauts géométriques, ou la prise en compte d'une déformée correspondant à un état géométrique différent, peut conduire à des résultats de simulation qui ne reflètent pas le réel.

Une méthode de *filtrage des données de mesure* a été mise en place afin de faciliter la composition des écarts géométriques évalués par la mesure et par la simulation. Une représentation modale est utilisée afin d'obtenir des champs d'écarts de même dimension, basée sur une analyse de la qualité des données de mesure des composants.

La modélisation de l'environnement qui contraint le composant conditionne le résultat de l'évaluation. Des supports de mesure non dédiés sont considérés afin de garantir la modélisation des conditions aux limites appliquées sur le composant lors de sa mesure. La modélisation du comportement mécanique du composant influence également le résultat de l'évaluation. Des méthodes de recalage de modèle offrent la possibilité, à partir de données de mesure, d'évaluer les paramètres du modèle mécanique qui permettent à celui-ci de fournir une réponse aux sollicitations proche des données de mesure. Cependant ces méthodes, dont l'une a

été expérimentée, présentent des limites. Ainsi une méthode d'évaluation de la géométrie à l'état libre par retournement a été proposée, méthode qui s'appuie uniquement sur des données issues de la mesure, et qui offre la possibilité d'annuler certains effets de l'environnement. Cette méthode définit une géométrie à l'état libre qui constitue une *référence*, qui peut être utilisée afin d'améliorer la modélisation du comportement mécanique du composant.

Une étude de la sensibilité, du résultat d'évaluation de la géométrie à l'état libre du composant par compensation des effets de l'environnement, aux variations des paramètres jugés les plus influents, a été réalisée. L'étude de ces paramètres, qui concernent les domaines de la *mesure* et de la *simulation*, a contribué à la définition d'un cadre à la mise en œuvre de la méthode afin de garantir le résultat d'évaluation. L'étude a également souligné, dans le cas d'un composant peu contraint sur son support de mesure, l'impact du comportement mécanique du composant devant l'aspect géométrique de l'environnement. En effet, dans ce cas le comportement mécanique conditionne principalement la géométrie de la forme réelle contrainte.

La simulation d'assemblage est réalisée à partir de la géométrie à l'état libre des composants évaluée. Celle-ci est réalisée à l'aide de l'outil logiciel *AnaTolEFLex*, qui prend en compte la souplesse et le contact unilatéral entre les composants, et permet d'évaluer virtuellement le jeu entre les composants. Des méthodes de mesure ont été imaginées pour évaluer ce jeu au niveau de l'assemblage réel, afin de confronter les résultats de simulation aux résultats de mesure. L'analyse de ces méthodes et leur classement selon différents critères, a contribué à la sélection de celles qui sont les plus adaptées dans le contexte. Ces méthodes ont été mises en œuvre sur le support expérimental. La méthode de *mesure de jeu par différence* proposée garantit une non modification de l'état géométrique de l'assemblage, et l'obtention d'une représentation de la géométrie du jeu réel par la mesure indirecte.

La confrontation des résultats de mesure et de simulation de jeu a montré que les résultats de simulation, effectués à l'aide du logiciel *AnaTolEFLex*, et obtenus à partir des mesures réalisées sur le support expérimental, sont cohérents avec la réalité. Ils ont souligné l'importance de la modélisation de l'environnement réel et du comportement mécanique des composants. Des pistes ont été fournies afin d'améliorer d'une part la modélisation du comportement mécanique, et d'autre part le cadre d'expérimentation afin de remplacer des éléments réels difficilement modélisables.

Les apports principaux de ces travaux peuvent ainsi se résumer à :

- ✚ L'analyse du processus industriel de simulation d'assemblage, et de validation, afin de faire émerger les sources d'écarts géométriques qui caractérisent un assemblage flexible, et les contraintes de représentation de ces écarts dans le contexte.
- ✚ La mise en œuvre de la validation expérimentale d'une méthode d'évaluation de la géométrie à l'état libre d'un composant par mesure et par compensation des effets de l'environnement sur le composant par simulation.
- ✚ Une analyse de sensibilité de la méthode aux variations des différents paramètres de mesure et de simulation, afin de définir un cadre pour la mise en œuvre. Une analyse modale des écarts à une géométrie de référence a également contribué à la correction de certains paramètres du modèle.
- ✚ L'application d'une méthode de retournement dans un contexte flexible, afin d'annuler certains effets de l'environnement sur la géométrie du composant, qui fournit une géométrie à l'état libre de référence.
- ✚ La proposition de méthodes de mesure de jeu dans un assemblage de composants souples, et leur mise en œuvre expérimentale.
- ✚ La conception et la spécification intégrales d'un support expérimental, représentatif des problématiques d'assemblage industrielles, qui a permis la mise en œuvre des méthodes proposées, et qui servira également de support aux démonstrations dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*.

Perspectives

La modélisation du réel conditionne la validité du résultat de simulation. Simplifier l'assemblage en remplaçant les épingles de pré-assemblage par des masses devrait réduire les écarts liés aux erreurs de modélisation. La prise en compte des défauts de positionnement dans le plan des *longerons*, et des défauts géométriques restant après le contre-perçage, devrait également réduire ces écarts. La modélisation d'un comportement légèrement anisotropique du *couvercle* ou la prise en compte de contraintes résiduelles en surface (phénomènes liés au procédé de laminage) peuvent limiter les erreurs liées à la modélisation. Le tout permettra d'améliorer le résultat de simulation de jeu à l'aide du logiciel *Anatoleflex*.

La mise en œuvre de la simulation d'assemblage, à partir des mesures réalisées sur les composants, sera attendue sur le démonstrateur *LAWiB* du projet européen *LOCOMACHS*. Une étude préliminaire sera nécessaire afin de déterminer les entités géométriques à mesurer sur chacun des composants et sous-ensembles. Les mesures seront réalisées à l'aide d'un système d'acquisition différent de celui utilisé dans ces travaux. Il sera donc nécessaire d'adapter la procédure de filtrage développée. Ce démonstrateur est de taille plus importante, et entièrement en matériaux composites. Les maillages *Eléments Finis* seront probablement définis, mais il sera nécessaire de procéder à une opération de recalage de modèle afin d'ajuster les paramètres qui définissent le comportement du matériau composite utilisé.

La procédure de filtrage actuelle ne garantit pas la représentation des défauts locaux typiques des matériaux composites. La difficulté consiste à trouver le bon compromis entre la finesse de représentation et le coût de calcul. Ainsi il n'est pas envisageable de conserver l'intégralité des données de mesure. Cependant il pourrait être intéressant de détecter ces défauts géométriques, en étudiant par exemple les variations de courbures sur données discrètes, et en adaptant localement la finesse de la représentation afin de prendre en compte ces défauts dans la simulation d'assemblage. Il sera toutefois nécessaire de garantir que cela ne perturbe pas les performances de la simulation.

Une analyse de sensibilité plus poussée mériterait d'être menée. Le recensement des causes et effets, et l'étude des paramètres jugés les plus influents, ont contribué à la définition d'un cadre de mise en œuvre afin de garantir le résultat de l'évaluation. Il s'agirait maintenant d'évaluer l'incertitude sur le résultat d'évaluation en fonction des variations potentielles des paramètres et des données d'entrée. Une analyse à l'aide d'une méthode de *Monte-Carlo* permettrait d'évaluer cette incertitude. Cependant, vu le très grand nombre de paramètres, et leur nature différente, cela passe par une modélisation préliminaire du problème, de façon à faciliter la mise en œuvre de ce calcul pour différents jeux de paramètres et de données d'entrée.

Les technologies de mesure sans contact par *tomographie*, par *ultrasons* ou par *courants de Foucault*, offrent des perspectives très intéressantes dans le contexte de la mesure de jeu au sein d'un assemblage, surtout dans le contexte de composants souples. Il serait intéressant de pouvoir les mettre en œuvre et comparer leurs performances par rapport à la méthode de mesure de jeu par différence imaginée dans ces travaux. La définition d'un *jeu étalon* faciliterait la caractérisation des différentes méthodes.

Références

Normes

- AFNOR NF EN 9100 (2010). Nf en 9100 - série aérospatiale - système de management de la qualité - exigences pour les organismes de l'aéronautique, l'espace et la défense.
- ASME Y14.5 (2009). Asme y14.5 2009 - dimensioning and tolerancing.
- ISO 10579 (2010). Iso 10579 - dessins techniques - cotation et tolérancement - pièces non rigides.
- ISO 12780-2 (2011). Iso 12780-2 - spécification géométrique des produits (gps) - rectitude - partie 2 : opérateurs de spécification.
- ISO 17450-1 (2011). Iso 17450-1 - spécification géométrique des produits (gps) - concepts généraux - partie 1 : Modèle pour la spécification et la vérification géométriques.
- ISO 230-1 (2012). Iso 230-1 - code d'essai des machines-outils - partie 1 : exactitude géométrique des machines fonctionnant à vide ou dans des conditions quasi-statiques.
- ISO 8785 (1998). Iso 8785 - spécification géométrique des produits (gps) - imperfections de surface - termes, définitions et paramètres.

Références bibliographiques

- ABENHAIM, A. N., DESROCHERS, A., TAHAN, A. S. et BIGEON, J. (2015). A virtual fixture using a fe-based transformation model embedded into a constrained optimization for the dimensional inspection of nonrigid parts. *Computer Aided Design*, 62:248 – 258.
- ABENHAIM, A. N., TAHAN, A. S., DESROCHERS, A. et MARANZANA, R. (2011). A novel approach for the inspection of flexible parts without the use of special fixtures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 133:1 – 11.
- ABENHAIM, G. N. (2009). Nouvelle méthode d'inspection des pièces flexibles sans gabarit de conformité. *Thèse de Doctorat, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec*.
- ABENHAIM, G. N., DESROCHERS, A. et TAHAN, A. S. (2012a). An investigation of the repeatability of nonrigid parts measurements : A case study of an aluminum panel. *12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, 10:105 – 111.
- ABENHAIM, G. N., DESROCHERS, A. et TAHAN, A. S. (2012b). Nonrigid parts' specification and inspection methods : notions, challenges, and recent advancements. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63:741 – 752.

- ABENHAÏM, G. N., TAHAN, A. S., DESROCHERS, A. et LALONDE, J. (2013). Aerospace panels fixtureless inspection methods with restraining force requirements ; a technology review. *SAE Technical Paper*.
- ADAMS, J. D. et WHITNEY, D. E. (1999). Application of screw theory to constraint analysis of mechanical assemblies joined by features. *Journal of Mechanical Design*, 123:26 – 32.
- ADRAGNA, P. A. (2007). Tolérancement des systèmes assemblés, une approche par le tolérancement inertiel et modal. *Thèse de Doctorat, Université de Savoie*.
- ADRAGNA, P. A., SAMPER, S. et FAVRELIÈRE, H. (2010). How form errors impact on 2d precision assembly with clearance ? *Precision Assembly Technologies and Systems*, 315:50 – 59.
- AIDIBE, A. (2014). Inspection des pièces flexibles sans gabarit de conformation. *Thèse de Doctorat, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec*.
- AIDIBE, A., TAHAN, A. S. et ABENHAÏM, G. N. (2012). Distinguishing profile deviations from a part's deformation using the maximum normed residual test. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 7:18 – 28.
- ANDOLFATTO, L. (2013). Assistance à l'élaboration de gammes d'assemblage innovantes de structures composites. *Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- ANSELMETTI, B. (2012). Iso manufacturing tolerancing : three-dimensional transfer with analysis line method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61:1085 – 1099.
- ANSELMETTI, B. et MAWUSSI, K. (2001). Cotation fonctionnelle des interfaces entre pièces. *Integrated Design and Production*.
- ANSELMETTI, B. et MAWUSSI, K. (2003). Computer aided tolerancing using positioning features. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 3:15 – 21.
- ANWER, N., BALLU, A. et MATHIEU, L. (2013). The skin model, a comprehensive geometric model for engineering design. *Manufacturing Technology*, 62:143 – 146.
- ARDAÏFIO, M. A. (1995). Methods for capturing design intent using key characteristics. *Master of Science, Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Mechanical Engineering*.
- ASCIONE, R. et POLINI, W. (2010). Measurement of nonrigid freeform surfaces by coordinate measuring machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51:1055 – 1067.
- AUDFRAY, N. (2012). Une approche globale pour la métrologie 3d automatique multi-systèmes. *Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- AUDFRAY, N., MEHDI-SOUZANI, C., ANWER, N., ZHAO, H. et LARTIGUE, C. (2010). Méthodes d'identification de caractéristiques géométriques d'un nuage de points issu de la mesure 3d sans contact. *Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique*.
- AUDFRAY, N., MEHDI-SOUZANI, C. et LARTIGUE, C. (2013). A novel approach for 3d part inspection using laser-plane sensors. *Procedia CIRP, the 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, 10:23 – 29.
- AYADI, B., ANSELMETTI, B., BOUAZIZ, Z. et ZGHAL, A. (2008). Three-dimensional modelling of manufacturing tolerancing using the ascendant approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39:279 – 290.

- BALLOT, E. (1995). Lois de comportement géométrique des mécanismes pour le tolérancement. *Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- BALLU, A. (2009a). Caractérisation et métrologie de la géométrie et des déplacements pour le tolérancement et la biomécanique. *Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Laboratoire de Mécanique Physique, Université de Bordeaux 1*.
- BALLU, A. (2009b). Measurement of gap hull for model validation, product verification and maintenance. *11th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*.
- BALLU, A., DANTAN, J. Y. et MATHIEU, L. (2007). Tolérancement géométrique des produits - langage de spécification : Geospelling. *Editions Hermes-Lavoisier, ISBN 978-2-7462-1509-2*, pages 39 – 66.
- BENTLEY, J. L. (1975). Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 18:509 – 517.
- BESIC, I., VAN GESTEL, N., KRUTH, J. P., BLEYS, P. et HODOLIC, J. (2011). Accuracy improvement of laser line scanning for feature measurements on cmm. *Optics and Lasers in Engineering*, 49:1274 – 1280.
- BESL, P. J. et McKAY, N. (1992). A method for registration of 3d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14:239 – 256.
- BHIDE, S., AMETA, G., DAVIDSON, J. K. et SHAH, J. J. (2007). Tolerance-maps applied to the straightness and orientation of an axis. *Models for Computer Aided Tolerancing in Design and Manufacturing*, pages 45 – 54.
- BISPO, E. M. et FISHER, R. B. (1996). Free-form surface matching for surface inspection. *Proceedings of the 6th IMA Conference on the Mathematics of Surfaces*, pages 119 – 136.
- BLAEDEL, K., SWIFT, B., CLAUDET, A., KASPER, E. et PETTERSON, S. (2002). Metrology of non-rigid objects. *Technical Report, Lawrence Livermore National Laboratory*.
- BOEING (1992). Key characteristics : the first step to advance quality. *The Company*.
- BOURDET, P. (1973). Chaines de cotes de fabrication (méthode des delta 1) : première partie "modèles". *L'ingénieur et le technicien de l'enseignement technique*.
- BOURDET, P. et CLEMENT, A. (1988). A study of optimal-criteria identification based on the small-displacement screw model. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 37:503 – 506.
- BOUSSUGE, F., LÉON, J. C., HAHMANN, S. et FINE, L. (2012). An analysis of dmu transformation requirements for structural assembly simulations. *The 8th International Conference on Engineering Computational Technology*.
- BRETEAU, P. (2009). Simulation d'assemblage flexible par la mesure - application au domaine de l'aéronautique. *Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- BRUYÈRE, J., DANTAN, J. Y., BIGOT, R. et MARTIN, P. (2007). Statistical tolerance analysis of bevel gear by tooth contact analysis and monte carlo simulation. *Mechanism and Machine Theory*, 42:1326 – 1351.
- BUTTRICK, J. N. (2014). Shim measurement system and method of operating the same. *US 8813382*.
- CAI, W., HU, S. J. et YUAN, J. X. (1996). Deformable sheet metal fixturing : principles, algorithms, and simulations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 118:318 – 324.

- CAMELIO, J. A., HU, S. J. et CEGLAREK, D. (2003). Modeling variation propagation of multi-station assembly systems with compliant parts. *Journal of Mechanical Design*, 125:673 – 681.
- CAMELIO, J. A., HU, S. J. et CEGLAREK, D. (2004). Impact of fixture design on sheet metal assembly variation. *Journal of Manufacturing Systems*, 23:182 – 193.
- CAPACITEC (2015). Gapman. <http://www.capacitec.com/Products/Gap-Measurement-Systems>.
- CARMIGNATO, S., SAVIO, E. et DE CHIFFRE, L. (2004). Ct techniques for reconstructing 3d geometrical models of complex parts : an approach for traceability establishment and uncertainty evaluation. *2nd International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions*, pages 387 – 390.
- CHAVANNE, R. (2012). Contribution au tolérancement fonctionnel 3d des mécanismes complexes : synthèse des spécifications et analyse de tolérances. *Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- CID, G. (2005). Etablissement des relations de comportement de mécanismes avec prise en compte des écarts géométriques et des souplesses des composants. *Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- CLÉMENT, A., DESROCHERS, A. et RIVIÈRE, A. (1991). Theory and practice of 3d tolerancing for assembly. *2nd CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, pages 25 – 55.
- CLOZEL, P. (1990). Mecamaster, expertise en conception mécanique pour les bureaux d'études. *International Conference StruCoMe*, pages 757 – 770.
- CONTRI, A. (2002). Qualité géométrique de la mesure de surfaces complexes par moyens optiques. *Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- CONTRI, A., BOURDET, P. et LARTIGUE, C. (2002). Quality of 3d digitised points obtained with non-contact optical sensors. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51:443 – 446.
- CUNG, T. L., JOUBERT, P. Y. et VOURC'H, E. (2011). Eddy current evaluation of air-gaps in aeronautical multilayered assemblies using a multi-frequency behavioral model. *Measurement*, 44:1108 – 1116.
- DANTAN, J. Y., BALLU, A. et MATHIEU, L. (2008a). Geometrical product specifications - model for product life cycle. *Computer Aided Design*, 40:493 – 501.
- DANTAN, J. Y., BRUYERE, J., BAUDOUIN, C. et MATHIEU, L. (2007). Geometrical specification model for gear - expression, metrology and analysis. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56:517 – 520.
- DANTAN, J. Y., HASSAN, A., ETIENNE, A., SIADAT, A. et MARTIN, P. (2008b). Information modeling for variation management during the product and manufacturing process design. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2:107 – 118.
- DENKENA, B., AHLERS, H., BERG, F., WOLF, T. et TÖNSHOFF, H. K. (2002). Fast inspection of larger sized curved surfaces by stripe projection. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51:499 – 502.
- DERAEMAERKER, A., LADEVÈZE, P. et LE LOCH, S. (2003). Results obtained by the cre updating method using a plate model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17:47 – 54.
- ESTLER, W., EDMUNDSON, K., PEGGS, G. et PARKER, D. (2002). Large-scale metrology - an update. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51:587 – 609.
- EVANS, C. J., HOCKEN, R. J. et ESTLER, W. T. (1996). Self-calibration : reversal, redundancy, error separation, and "absolute testing". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 45:617 – 634.

- EVANS, D. H. (1974). Statistical tolerancing : the state of the art. *Journal of Quality Technology*, 6:188–195.
- FAVRELIERE, H. (2009). Tolérancement modal : de la métrologie vers les spécifications. *Thèse de Doctorat, Université de Savoie*.
- FLEMING, A. (1988). Geometric relationships between toleranced features. *Artificial Intelligence*, 37:403 – 412.
- FRIEDMAN, J. H., BENTLEY, J. L. et FINKEL, R. A. (1977). An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 3:209 – 226.
- GANT, F., ROUCH, P., LOUF, F. et CHAMPANEY, L. (2011). Definition and updating of simplified models of joint stiffness. *International Journal of Solids and Structures*, 48:775 – 784.
- GENTILINI, I. et SHIMADA, K. (2011). Predicting and evaluating the post-assembly shape of thin-walled components via 3d laser digitization and fea simulation of the assembly process. *Computer Aided Design*, 43:316 – 328.
- GIORDANO, M. et DURET, D. (1993). Clearance space and deviation space. *3rd CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, pages 179 – 196.
- GRANDJEAN, J. (2013). Influence des défauts de forme sur les performances d’assemblages - application aux prothèses totales de hanche. *Thèse de Doctorat, Université de Grenoble*.
- HASSANI, A., AIFAOU, N., BENAMARA, A. et SAMPER, S. (2009). Méthodologie d’analyse et d’optimisation des tolérances dans un contexte de conception intégrée. *Mécanique et Industries*, 9:381 – 395.
- HIRATA, K., YAJIMA, T. et SONDA, Y. (2009). Shape inspection method and apparatus. *US 7589844*.
- HONG, Y. S. et CHANG, T. C. (2002). A comprehensive review of tolerancing research. *International Journal of Production Research*, 40:2425 – 2459.
- HUANG, W. et CEGLAREK, D. (2002). Mode-based decomposition of part form error by discrete-cosine-transform with implementation to assembly and stamping system with compliant parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51:21 – 26.
- HUANG, X. et GU, P. (1998). Cad-model based inspection of sculptured surfaces with datums. *International Journal of Production Research*, 36:1351 – 1367.
- HUANG, X., GU, P. et ZERNICKE, R. (1996). Localization and comparison of two free-form surfaces. *Computer Aided Design*, 28:1017 – 1022.
- JAMSHIDI, J., KAYANI, A., IRAVANI, P., MAROPOULOS, P. G. et SUMMERS, M. D. (2010). Manufacturing and assembly automation by integrated metrology systems for aircraft wing fabrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 224:25 – 36.
- JARAMILLO, A., PRIETO, F. et BOULANGER, P. (2013). Fixtureless inspection of deformable parts using partial captures. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14:77 – 83.
- JARAMILLO, A. E., BOULANGER, P. et PRIETO, F. (2009). On-line 3-d inspection of deformable parts using fem trained radial basis functions. *12th International Conference on Computer Vision*, 1:1733 – 1739.
- KARP, B. et ADAM, G. (1994). Small gap width measurement with a finite x-ray source. *NDT and E International*, 27:21 – 25.

- KASE, K., MAKINOCHI, A., NAKAGAWA, T., SUZUKI, H. et KIMURA, F. (1999). Shape error evaluation method of free-form surfaces. *Computer Aided Design*, 31:495 – 505.
- KIM, S. R., CHANG, S. K., JOO, H. S., HWANG, Y. T., YANG, S. W., KIM, J. H. et KIM, S. J. (2014). Swelling tape for filling gap. *US 20140106207*.
- KONG, Z., KUMAR, R., GOGINENI, S., ZHOU, Y. et CEGLAREK, D. (2006). Mode-based tolerance analysis in multi-station assembly using stream of variation model. *Transactions of North American Manufacturing Research Institution of SME*, 34:469 – 476.
- KOSMOPOULOS, D. et VARVARIGOU, T. (2001). Automated inspection of gaps on the automobile production line through stereo vision and specular reflection. *Computers in Industry*, 46:49 – 63.
- KRUTH, J., BARTSCHER, M., CARMIGNATO, S., SCHMITT, R., DE CHIFFRE, L. et WECKENMANN, A. (2011). Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60:821 – 842.
- LÊ, H. N. (2013). Influences des défauts de forme de surface sur le comportement des liaisons : étude expérimentale et théorique. *Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1*.
- LACROIX, C., MATHIEU, L., THIÉBAUT, F., DOUILLY, M. et FALGARONE, H. (2015). Numerical process based on measuring data for gap prediction of an assembly. *Procedia CIRP, 13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, 27:97 – 102.
- LADEVÈZE, P. (1983). Model updating of complex structures. *Technical Report, Aérospatiale, Les Mureaux*.
- LARTIGUE, C., CONTRI, A. et BOURDET, P. (2002). Digitised point quality in relation with point exploitation. *Measurement*, 32:193 – 203.
- LARTIGUE, C., THIÉBAUT, F., BOURDET, P. et ANWER, N. (2006). Dimensional metrology of flexible parts : Identification of geometrical deviations from optical measurements. *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology*, 7:196 – 203.
- LECOMPTE, J., LEGOFF, O. et HASCOET, J. Y. (2010). Technological form defects identification using discrete cosine transform method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51:1033 – 1044.
- LEE, D. et THORNTON, A. (1996). The identification and use of key characteristics in the products development process. *ASME Design Engineering Technical Conference*.
- LEMES, S. (2010). Validation of numerical simulations by digital scanning of 3d sheet metal objects. *Thèse de Doctorat, University of Ljubljana*.
- LI, Y. et GU, P. (2004). Free-form surface inspection techniques state of the art review. *Computer Aided Design*, 36:1395 – 1417.
- LI, Y. et GU, P. (2005a). Feature-based alignment and comparison between portion and whole of free-form surfaces. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54:135 – 138.
- LI, Y. et GU, P. (2005b). Inspection of free-form shaped parts. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21:421 – 430.
- LINDAU, B., ANDERSSON, A., LINDKVIST, L. et SÖDERBERG, R. (2012). Body in white geometry measurements of non-rigid components : a virtual perspective. *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences (IDETC) and Computers and Information in Engineering Conference (CIE)*, pages 497 – 505.

- LIU, S. C., HU, S. J. et WOO, T. C. (1996). Tolerance analysis for sheet metal assemblies. *Journal of Mechanical Design*, 118:62 – 67.
- LOCOMACHS (2012). Low cost manufacturing and assembly of composite and hybrid structures. *Projet de recherche européen FP7* - <http://www.locomachs.eu/>.
- MAHMUD, M., JOANNIC, D., ROY, R., ISHEIL, A. et FONTAINE, J.-F. (2011). 3d part inspection path planning of a laser scanner with control on the uncertainty. *Computer Aided Design*, 43:345 – 355.
- MANTRIPRAGADA, R. et WHITNEY, D. E. (1998). The datum flow chain : A systematic approach to assembly design and modeling. *Research in Engineering Design*, 10:150 – 165.
- MARGUET, B. (2001). Contribution à l'analyse des variations géométriques dans les ensembles structuraux en aéronautique : Démarche et outils. *Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- MARGUET, B., FALGARONE, H. et CHEVASSUS, N. (2003). Anatole : un outil d'analyse 3d des variations géométriques pour la conception de produit aéronautique. *Tolérancement Géométrique des Produits*, 18:113 – 122.
- MAROPOULOS, P., GUO, Y., JAMSHIDI, J. et CAI, B. (2008). Large volume metrology process models : A framework for integrating measurement with assembly planning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57:477 – 480.
- MAROPOULOS, P., VICHARE, P., MARTIN, O., MUELNER, J., SUMMERS, M. D. et KAYANI, A. (2011). Early design verification of complex assembly variability using a hybrid-model based and physical testing-methodology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60:207 – 210.
- MARTIN, O. C., MUELNER, J. E. and Wang, Z. K. A., TOMLINSON, D., MAROPOULOS, P. G. et HELGASSON, P. (2011). Metrology enhanced tooling for aerospace (meta) : A live fixturing wing box assembly case study. *7th International Conference on Digital Enterprise Technology*.
- MARTINEZ, S., CUESTA, E., BARREIRO, J. et ALVAREZ, B. (2010). Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46:621 – 629.
- MATHIEU, L. (2007). Contribution à la maîtrise des variations géométriques des produits le long de leur cycle de vie. *Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- MATHIEU, L. et BALLU, A. (2003). Geospelling : A common language for specification and verification to express method uncertainty. *Proceedings of 8th CIRP seminar on Computer Aided Tolerancing*, pages 70 – 79.
- MATHIEU, L. et MARGUET, B. (2001). Integrated design method to improve producibility based on product key characteristics and assembly sequences. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50:85 – 88.
- MATHIEU, L. et VILLENEUVE, F. (2007). Tolérancement géométrique des produits. *Editions Hermes-Lavoisier, ISBN 978-2-7462-1509-2*.
- MEHDI-SOUZANI, C., THIEBAUT, F. et LARTIGUE, C. (2006). Scan planning strategy for a general digitized surface. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 6:331 – 339.
- MERKLEY, K. G. (1998). Tolerance analysis of compliant assemblies. *Thèse de Doctorat, Brigham Young University*.

- MORIERE, S. (2010). Contribution à l'étude des assemblages avec prise en compte des défauts de forme : modélisation et expérimentation. *Thèse de Doctorat, Université de la Méditerranée*.
- MORONI, G., POLINI, W. et RASELLA, M. (2007). Non-rigid free form surface inspection : an aeronautical composite component case study. *Proceedings of 10th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*.
- MOTTERSHEAD, J. E. et FRISWELL, M. I. (1993). Model updating in structural dynamics : A survey. *Journal of Sound and Vibration*, 167:347 – 375.
- MOUNAUD, M. (2010). Contribution à l'analyse des défauts géométriques dans le routage d'un réseau hydraulique en aéronautique : Incidences sur la conception. *Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- MUELANER, J. E., KAYANI, A., MARTIN, O. et MAROPOULOS, P. (2011). Measurement assisted assembly and the roadmap to part-to-part assembly. *7th International Conference on Digital Enterprise Technology*, pages 11 – 19.
- MUELANER, J. E. et MAROPOULOS, P. G. (2010). Design for measurement assisted determinate assembly (mada) of large composite structures. *Journal of the Coordinate Metrology Systems Conference*, 5:18 – 25.
- PAHK, H. et AHN, W. J. (1996). Precision inspection system for aircraft parts having very thin features based on cad/cai integration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 12:442 – 449.
- PEGGS, G. N., MAROPOULOS, P. G., HUGHES, E. B., FORBES, A. B., ROBSON, S., ZIEBART, M. et MURALIKRISHNAN, B. (2009). Recent developments in large-scale dimensional metrology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 51:587 – 609.
- PETIT, J. P. (2004). Spécification géométrique des produits : méthode d'analyse de tolérances. application en conception assistée par ordinateur. *Thèse de Doctorat, Université de Savoie*.
- PRIETO, F., REDARCE, H. T., LEPAGE, R. et BOULANGER, P. (1999). A non contact cad based inspection system. *Quality Control by Artificial Vision*, pages 33 – 38.
- RADOUANI, M. (2003). Contribution à la validation du modèle des chaînes de cotes. *Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- RADVAR-ESFAHLAN, H. et TAHAN, S. A. (2012). Nonrigid geometric metrology using generalized numerical inspection fixtures. *Precision Engineering*, 39:1 – 9.
- RAVISHANKAR, S., DUTT, H. N. V. et GURUMOORTHY, B. (2010). Automated inspection of aircraft parts using a modified icp algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46:227 – 236.
- REQUICHA, A. A. G. (1983). Toward a theory of geometric tolerancing. *The International Journal of Robotics Research*, 2:45 – 60.
- ROMDHANI, F. (2014). Méthodologie d'estimation des incertitudes d'un processus de mesure utilisant un bras polyarticulé portable. *Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne*.
- ROSENZVEIG, G. (2011). Recalage de modèles éléments finis de structures aéronautiques légères en vue de la simulation de leur assemblage. *Mémoire de Master, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- SAADAT, M. (2011). Challenges in the assembly of large aerospace components. *Integrated Systems, Design and Technology*, pages 37 – 46.

- SAADAT, M. et CRETIN, L. (2002). Measurement systems for large aerospace components. *Sensor Review*, 22:199 – 206.
- SAADAT, M., CRETIN, L., SIM, R. et NAJAFI, F. (2009). Deformation analysis of large aerospace components during assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41:145 – 155.
- SAADAT, M., SIM, R. et NAJAFI, F. (2007). Prediction of geometrical variations in airbus wingbox assembly. *Assembly Automation*, 27:324 – 332.
- SAMPER, S. (2007). Tolérancement et analyse des structures au service des systèmes souples et du défaut de forme. *Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Savoie*.
- SAMPER, S., ADRAGNA, P. A., FAVRELIERE, H. et PILLET, M. (2009). Modeling of 2d and 3d assemblies taking into account form errors of plane surfaces. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 9:1 – 12.
- SAMPER, S. et FORMOSA, F. (2007). Form defects tolerancing by natural modes analysis. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 7:44 – 51.
- SAVIO, E., DE CHIFFRE, L. et SCHMITT, R. (2007). Metrology of freeform shaped parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56:810 – 835.
- SCHLEICH, B., ANWER, N., MATHIEU, L. et WARTZACK, S. (2014). Skin model shapes : A new paradigm shift for geometric variations modelling in mechanical engineering. *Computer Aided Design*, 50:1 – 15.
- SCHLEICH, B. et WARTZACK, S. (2015). Approaches for the assembly simulation of skin model shapes. *Computer Aided Design*, 65:18 – 33.
- SCHWENKE, H., NEUSCHAEFER-RUBE, U., PFEIFER, T. et KUNZMANN, H. (2002). Optical methods for dimensional metrology in production engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51:685 – 699.
- SEGAL, Y. et TRICHTER, F. (1989). Gap width measurements in fuel elements. *NDT International*, 22:222 – 228.
- SHUKLA, N., CEGLAREK, D. et TIWARI, M. (2013). Key characteristics-based sensor distribution in multi-station assembly processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26:43 – 58.
- STRICHER, A. (2013). Tolérancement flexible d'assemblages de grandes structures aéronautiques. *Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- SUN, Y., PAGE, D. L., PAIK, J. K., KOSCHAN, A. et ABIDI, M. A. (2002). Triangle mesh-based edge detection and its application to surface segmentation and adaptive surface smoothing. *IEEE International Conference on Image Processing*, 3:825 – 828.
- TEISSANDIER, D., COUÉTARD, Y., GÉRARD, A., CENTRA, P. et LE BRETON, F. (1996). Three-dimensional functional tolerancing with proportioned assemblies clearance volume (u.p.e.l : Unions pondérées d'espaces de liberté). *ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 8:129 – 136.
- THIÉBAUT, F. (2001). Contribution à la définition d'un moyen unifié de gestion de la géométrie réaliste basé sur le calcul des lois de comportement des mécanismes. *Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- THIERY, C. (2013). Tomographie à rayons x. *Techniques de l'ingénieur CND : méthodes globales et volumiques*, base documentaire : TIB585DUO.

- THIRD-DIMENSION (2015). Gapgun. <http://www.third.com/us/products/gapgun-range>.
- THORNTON, A. C. (1996). Key characteristics : To cut variation and manufacturing costs, focus on key characteristics. *Association for Manufacturing Excellence*, pages 14 – 19.
- THORNTON, A. C. (1999). A mathematical framework for the key characteristic process. *Research in Engineering Design*, 11:145 – 157.
- THORNTON, A. C., DONNELLY, S. et ERTAN, B. (2000). More than just robust design : why product development organizations still contend with variation and its impact on quality. *Research in Engineering Design*, 12:127 – 143.
- VAN GESTEL, N., CUYPERS, S., BLEYS, P. et KRUTH, J. P. (2009). A performance evaluation test for laser line scanners on cmms. *Optics and Lasers in Engineering*, 47:336 – 342.
- VICHARE, P., MARTIN, O. et JAMSHIDI, J. (2013). Dimensional management for aerospace assemblies : framework implementation with case-based scenarios for simulation and measurement of in-process assembly variations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70:215 – 225.
- WECKENMANN, A. et GABBIA, A. (2006). Testing formed sheet metal parts using fringe projection and evaluation by virtual distortion compensation. *Fringe 2005*, pages 539 – 546.
- WECKENMANN, A., GALL, P. et GABBIA, A. (2005). 3d surface coordinate inspection of formed sheet material parts using optical measurement systems and virtual distortion compensation. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 5776:640 – 647.
- WECKENMANN, A., JIANG, X., SOMMER, K. D., NEUSCHAEFER-RUBE, V., SEEWIG, J., SHAW, L. et ESTLER, T. (2009). Multisensor data fusion in dimensional metrology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58:701 – 721.
- WECKENMANN, A. et WEICKMANN, J. (2006). Optical inspection of formed sheet metal parts applying fringe projection systems and virtual fixation. *Metrology and Measurement Systems*, 4:321 – 334.
- WECKENMANN, A., WEICKMANN, J. et PETROVIC, N. (2007). Shortening of inspection processes by virtual reverse deformation. *4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds*, pages 391 – 398.
- WHITEHOUSE, D. J. (1976). Some theoretical aspects of error separation techniques in surface metrology. *Journal of Physics E : Scientific Instruments*, 9:531 – 536.
- WHITNEY, D. E., ANDERSON, M., CADET, C., FINE, C., GOSSARD, D., THORNTON, A., GROOVER, M., NAGEL, R., OZSOY, T. et STENGER, H. (1995). Agile pathfinders in the aircraft and automobile industries : a progress report. *US Air Force Wright Patterson AFB*.
- ZHAO, H. (2010). Multisensor integration and discrete geometry processing for coordinate metrology. *Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- ZIRMI, S., PARIS, H. et BELAIDI, I. (2007). Analyse de la conception d'un montage d'usinage à l'aide d'éléments modulaires. *Mechanics and Industry*, 8:1 – 6.

Annexe **A**

Diagrammes de causes et effets

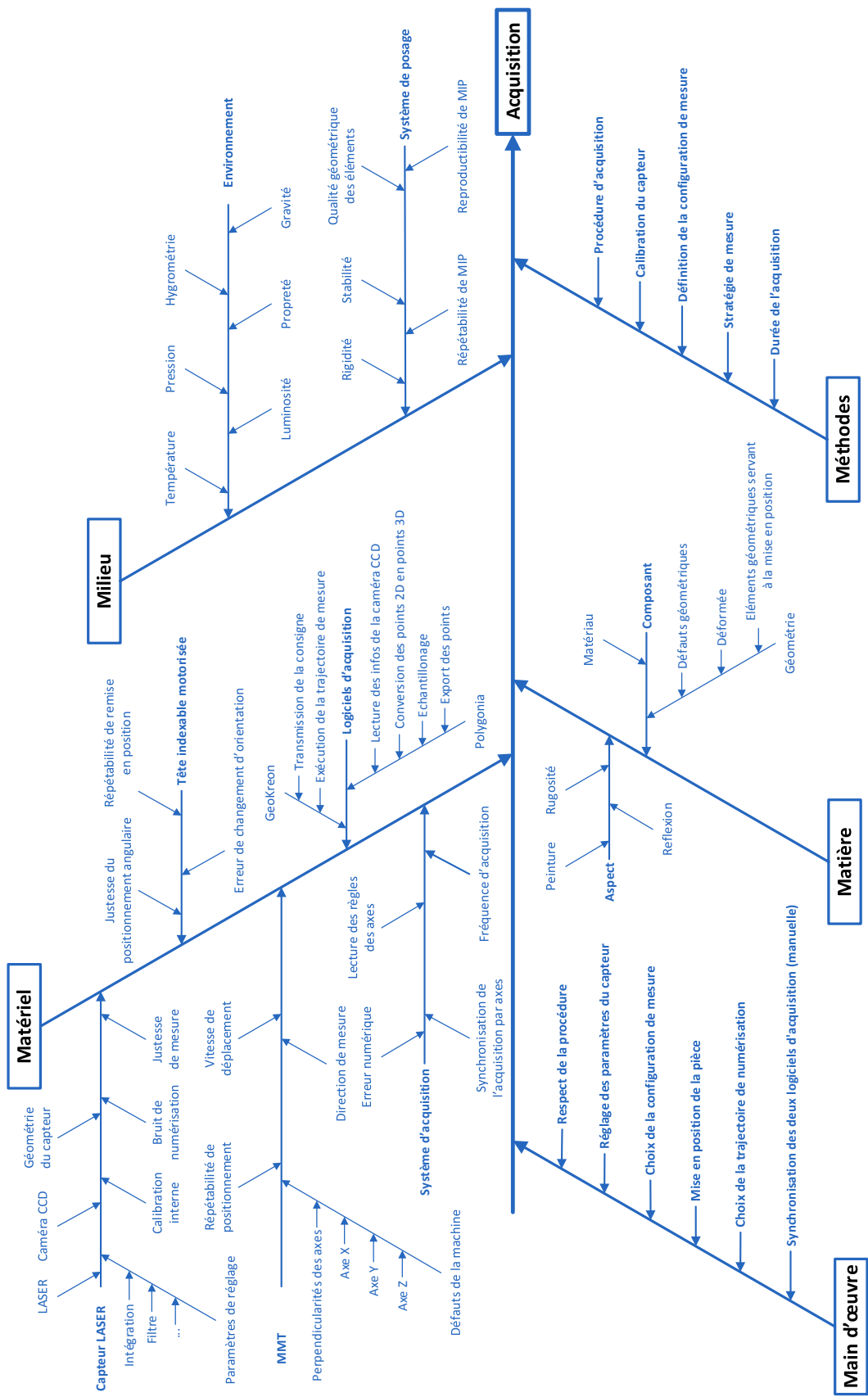


Figure A.1 – Diagramme de causes et effets concernant l'acquisition.

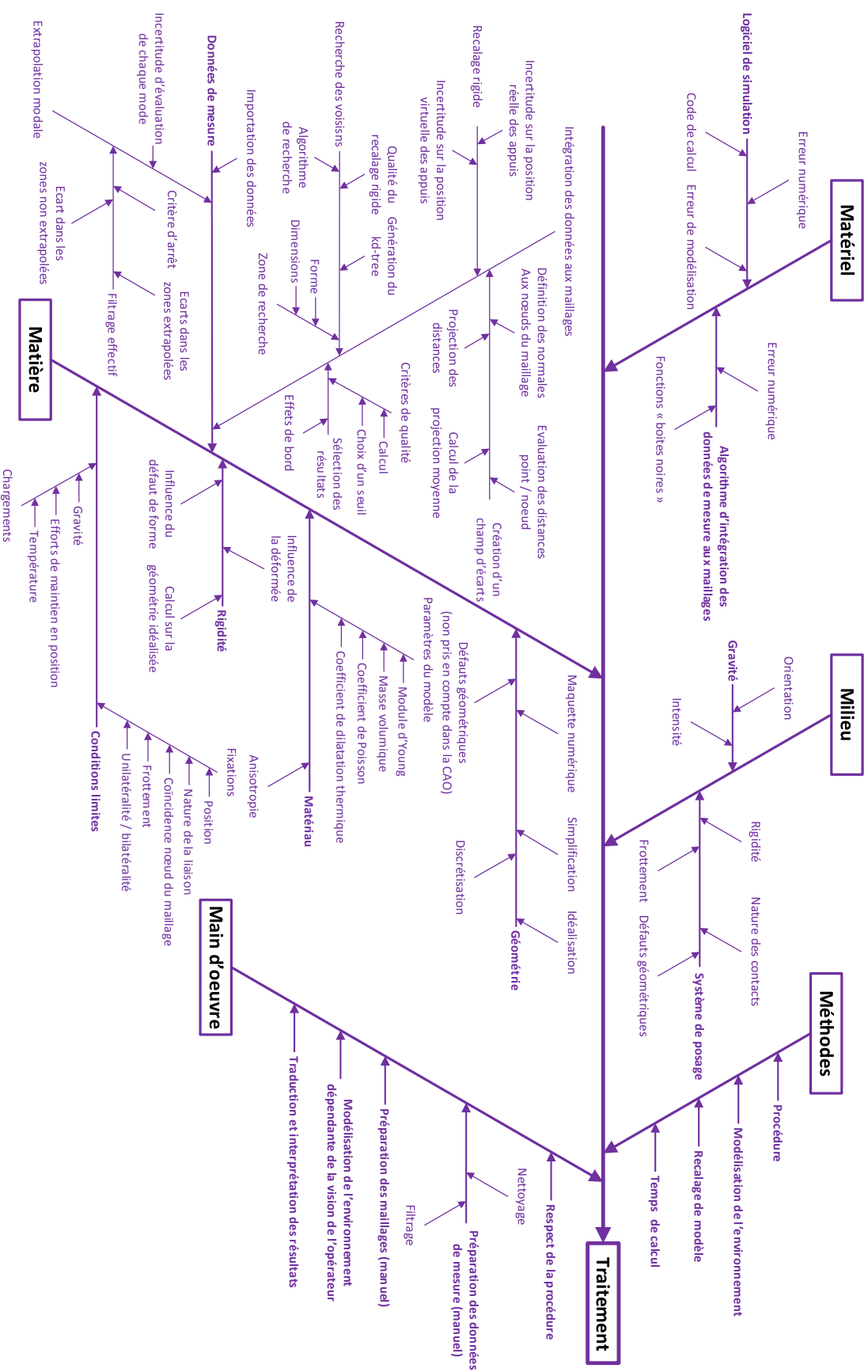


Figure A.2 – Diagramme de causes et effets concernant le traitement des données de mesure.

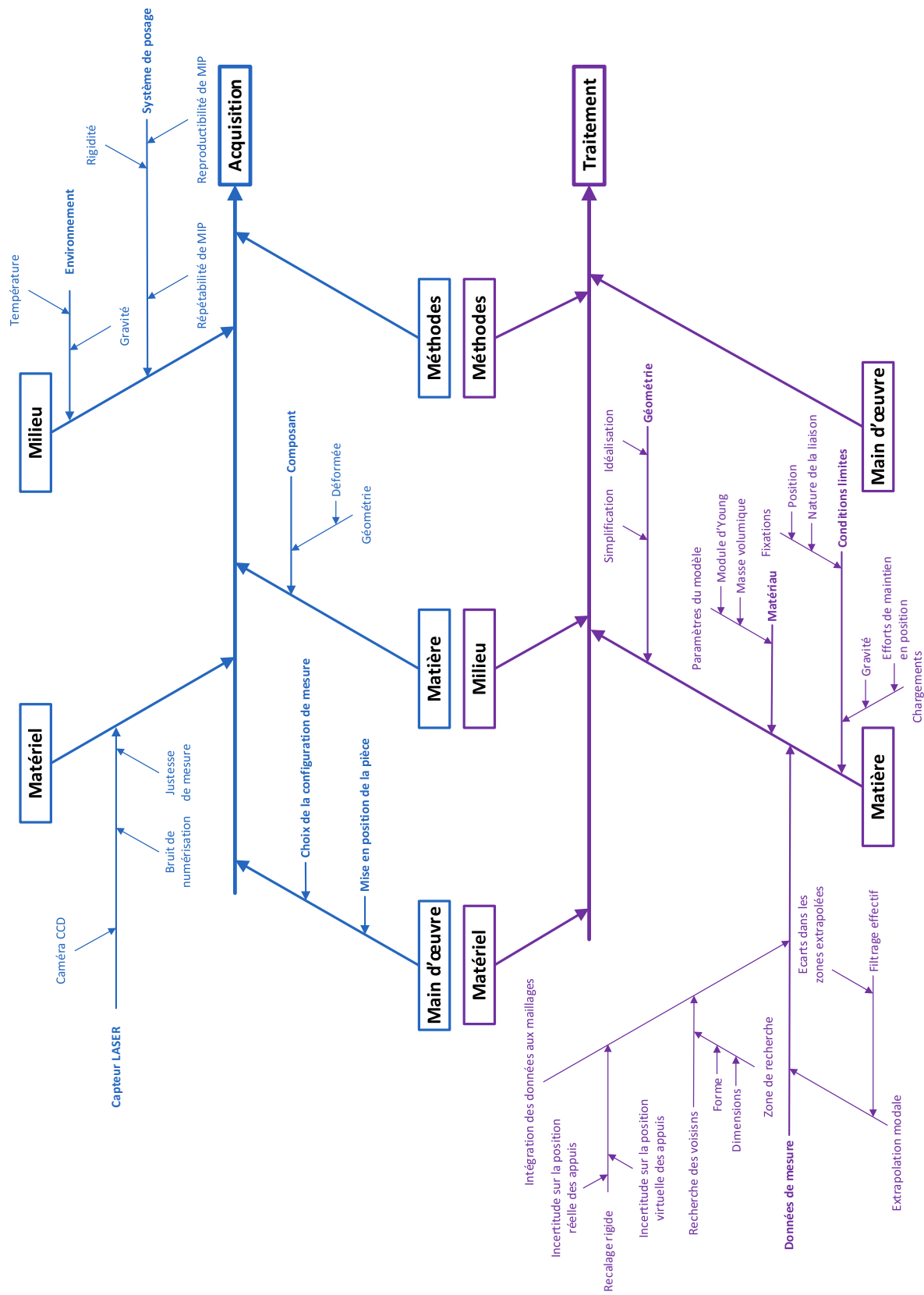
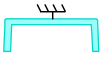
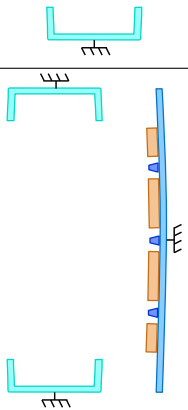
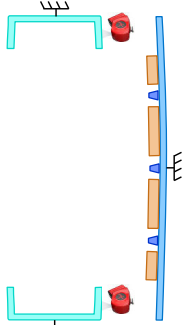
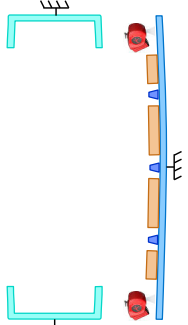

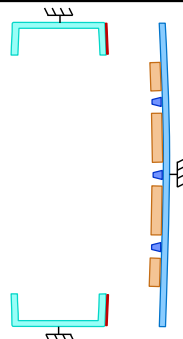
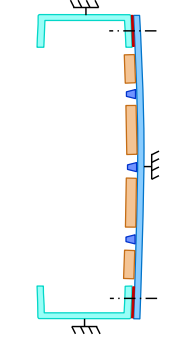
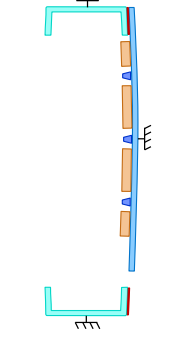
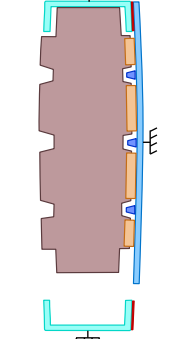
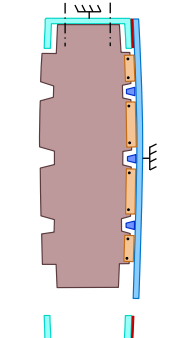


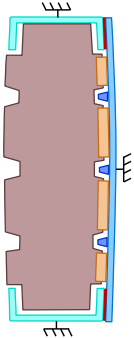
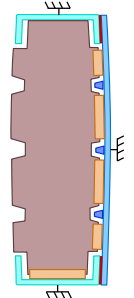
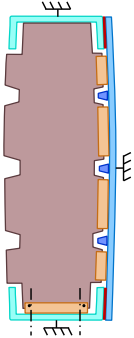
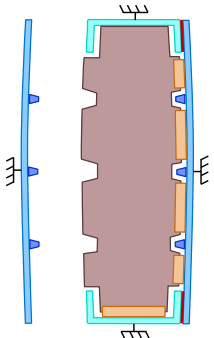
Figure A.3 – Diagrammes de causes et effets limités aux paramètres jugés les plus influents.

Annexe **B**

Séquence d'assemblage du démonstrateur LAWiB

Op.	Détail	Illustration
(1)	Positionnement des deux <i>longerons</i> sur les outillages	
	Positionnement du <i>couvercle</i> supérieur sur les outillages	
(2)	Mesure de la face supérieure des <i>longerons</i> (et de toutes les autres entités nécessaires à la simulation de l'assemblage des géométries mesurées)	
	Mesure de la face inférieure du <i>couvercle</i> (et de toutes les autres entités nécessaires à la simulation de l'assemblage des géométries mesurées)	
	Simulation du jeu entre le <i>couvercle</i> supérieur et les <i>longerons</i>	

Op.	Détail	Illustration
(3)	Réalisation des cales sur mesure	
	Assemblage du <i>couvercle</i> supérieur avec les cales (assemblage définitif sur le <i>longeron</i> arrière, et temporaire sur le <i>longeron</i> avant)	
(4)	Démontage du <i>longeron</i> avant	
	Positionnement de la <i>nervure</i> n°4 par rapport au <i>longeron</i> arrière et au <i>couvercle</i> supérieur	
	Fixation de la <i>nervure</i> n°4 sur le <i>longeron</i> arrière et le <i>couvercle</i> supérieur	

Op.	Détail	Illustration
	La procédure de positionnement et de fixation est répétée pour chaque <i>nervure</i>	
	Assemblage définitif du <i>longeron</i> avant avec le <i>couvercle</i> supérieur	
(5)	Positionnement du <i>clip</i> n°4 par rapport à la <i>nervure</i> n°4 et au <i>longeron</i> avant	
	Fixation du <i>clip</i> n°4 par rapport à la <i>nervure</i> n°4 et au <i>longeron</i> avant	
	La procédure de positionnement et de fixation est répétée pour chaque <i>clip</i>	
(6)	Positionnement du <i>couvercle</i> inférieur sur son outillage	

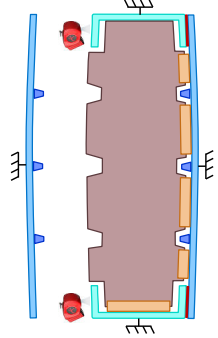
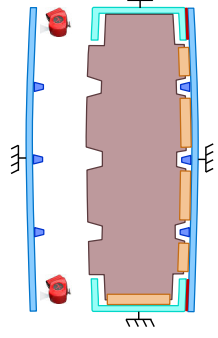

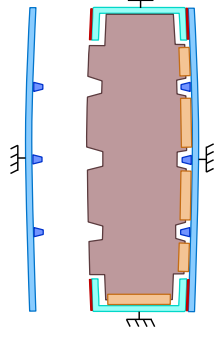
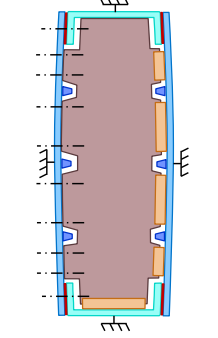
Op.	Détail	Illustration
(7)	Mesure de la face inférieure des <i>longerons</i> (et de toutes les autres entités nécessaires à la simulation de l'assemblage des géométries mesurées)	
	Mesure de la face supérieure du <i>couvercle</i> (et de toutes les autres entités nécessaires à la simulation de l'assemblage des géométries mesurées)	
	Simulation du jeu entre le <i>couvercle</i> inférieur et les <i>longerons</i>	
(8)	Réalisation des cales sur mesure	
	Assemblage du <i>couvercle</i> inférieur avec les cales (assemblage définitif sur les <i>longerons</i>)	

Tableau B.1 – Séquence d'assemblage du démonstrateur *LAWiB*.

Annexe **C**

Nomenclature du support expérimental

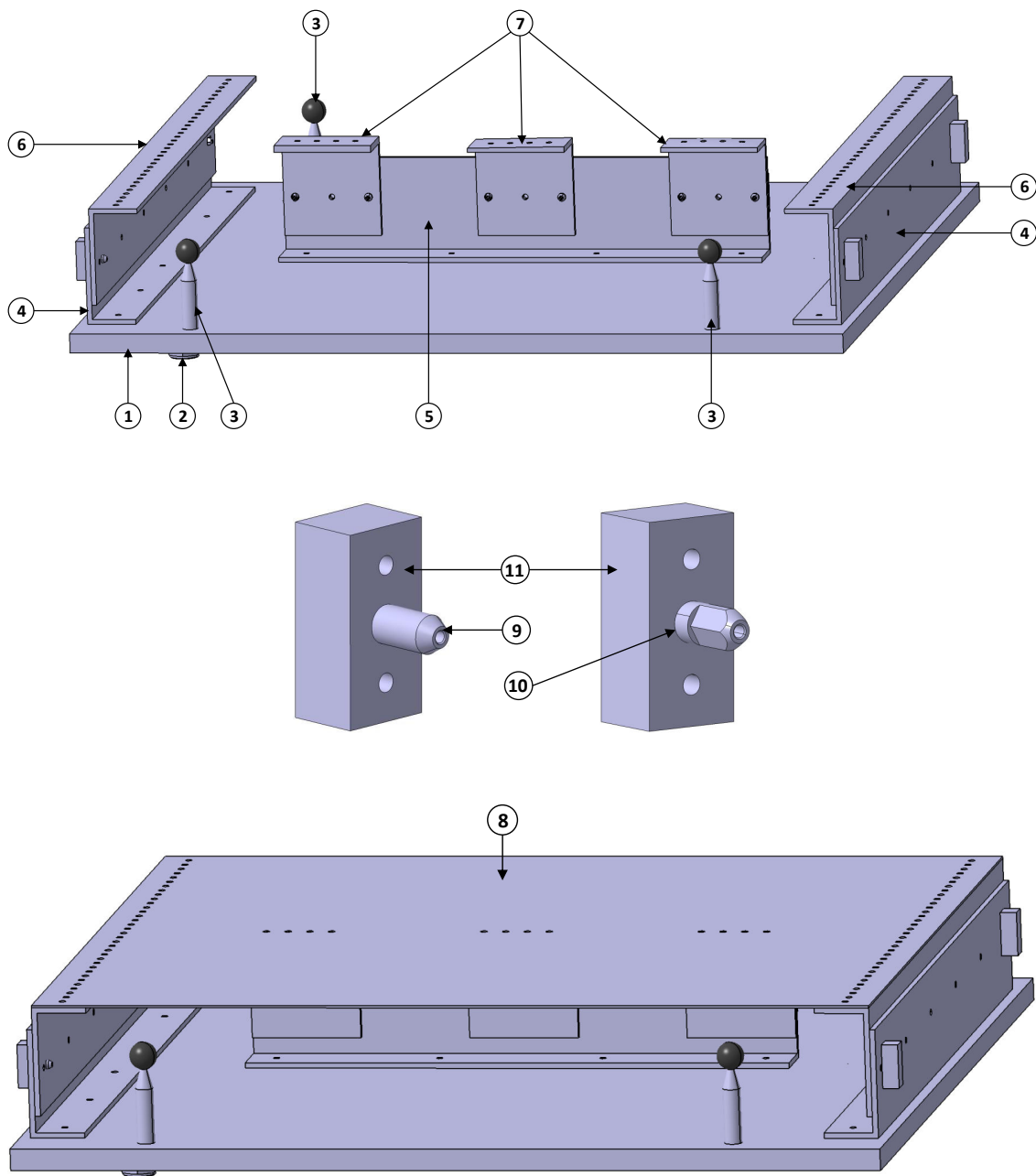


Figure C.1 – Nomenclature des composants du support expérimental.

Numéro	Désignation	Matériau	Remarques	Quantité
1	Plaque support	Aluminium		1
2	Pied	Acier	Element standard	3
3	Sphère	Acier	Sphère matifiée (pour mesure <i>LASER</i>)	3
4	Base longeron	Aluminium		2
5	Base clips	Aluminium		1
6	Longeron	Aluminium / Acier / Composite		2 + 2 + 2
7	Clip	Aluminium / Acier	Clips avec différents défauts géométriques	5 + 3
8	Couvercle	Aluminium / Composite	Pièces peintes pour éviter les reflets	1 + 1
9	Centreur	Acier	Elément standard	8
10	Locating	Acier	Elément standard	8
11	Support centreur locating	Aluminium		10
	Vis CHC M6L12	Acier	Elément de fixation (non représenté)	16
	Vis CHC M6L20	Acier	Elément de fixation (non représenté)	3
	Vis FHC M4L10	Acier	Elément de fixation (non représenté)	20
	Vis M6L18	Acier	Elément de fixation (non représenté)	24
	Ecrou H M6	Acier	Elément de fixation (non représenté)	24
	Epingles de pré-assemblage	Acier	Elément de fixation (non représenté)	12

Tableau C.1 – Nomenclature des composants du support expérimental.

Annexe **D**

Résultats de qualification du système de mesure utilisé

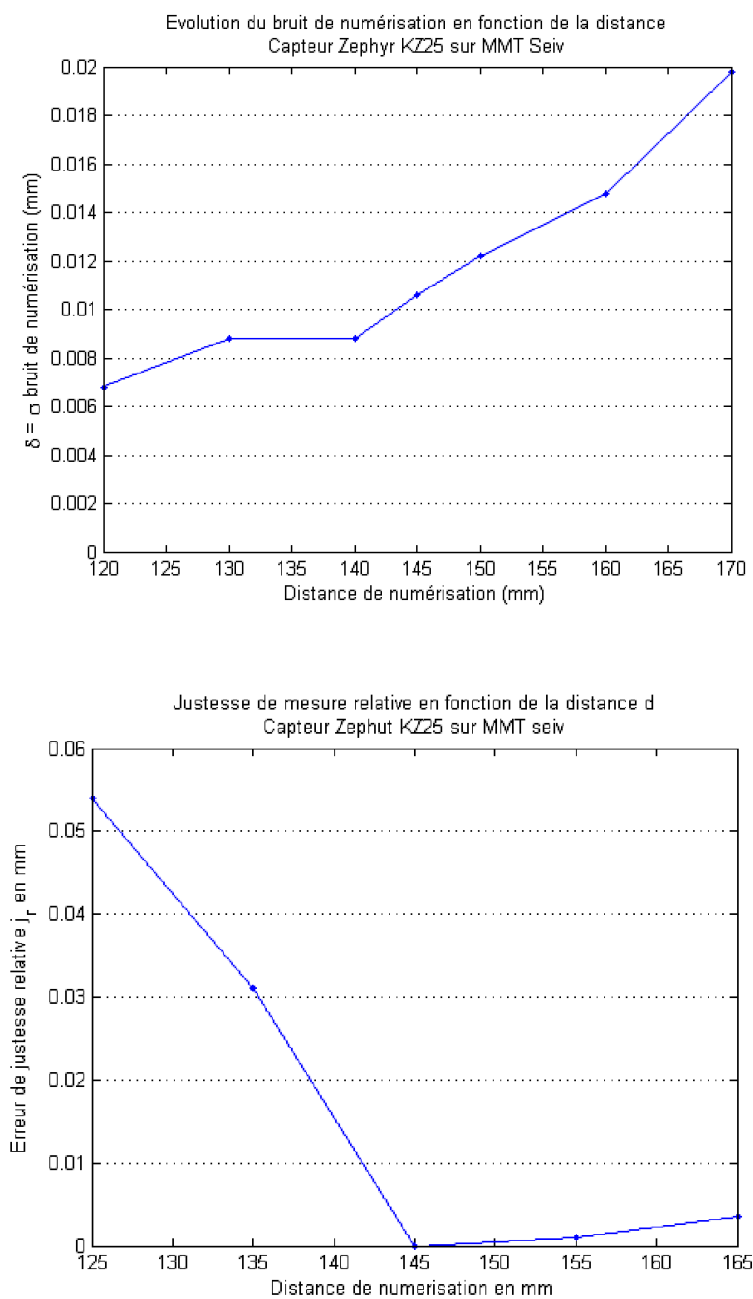


Figure D.1 – Résultats de bruit et de justesse évalués par [Audfray, 2012] pour l'ensemble *MMT* et capteur *LASER* plan.

	Capteur Porteur	Capteur <i>LASER</i> plan MMT
Qual.	Bruit δ Justesse e_t	0.009 0.01
Contraintes	d qualifiée bruit (mm) d qualifiée justesse (mm) α qualifié (°)	120-145 140-160 0-20

Tableau D.1 – Données qualifiées pour l'ensemble *MMT* et capteur *LASER* plan [Audfray, 2012].

Annexe **E**

Variation des champs d'écart étudiée dans différentes sections

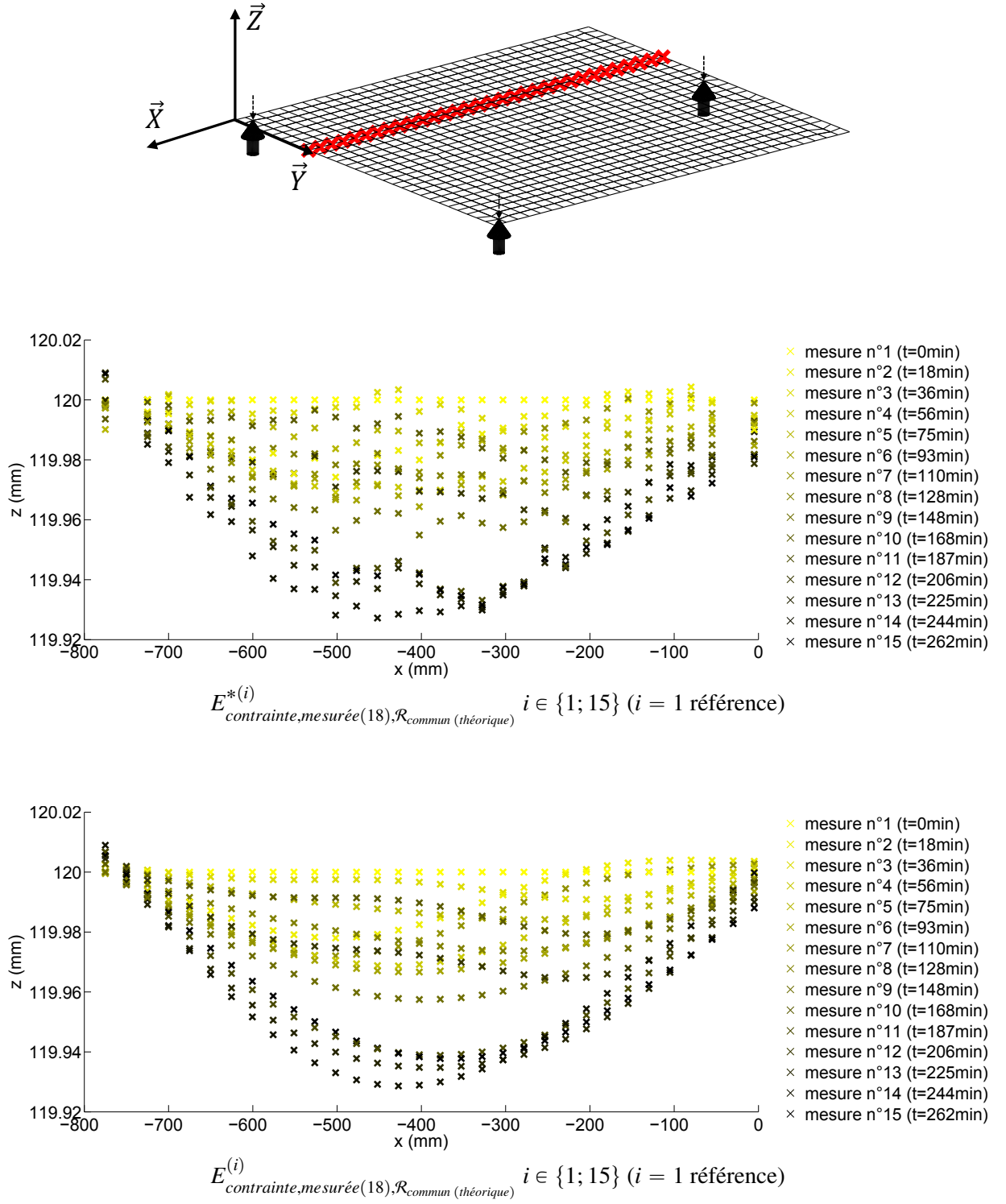


Figure E.1 – Evolution au cours du temps de la *géométrie contrainte* mesurée correspondant aux champs d'écarts évalués (partiels et complets) par rapport à la première évaluation ($i = 1$ référence), dans une section donnée (ici section $y = 200\text{mm}$). Il y a environ 18min entre deux mesures consécutives.

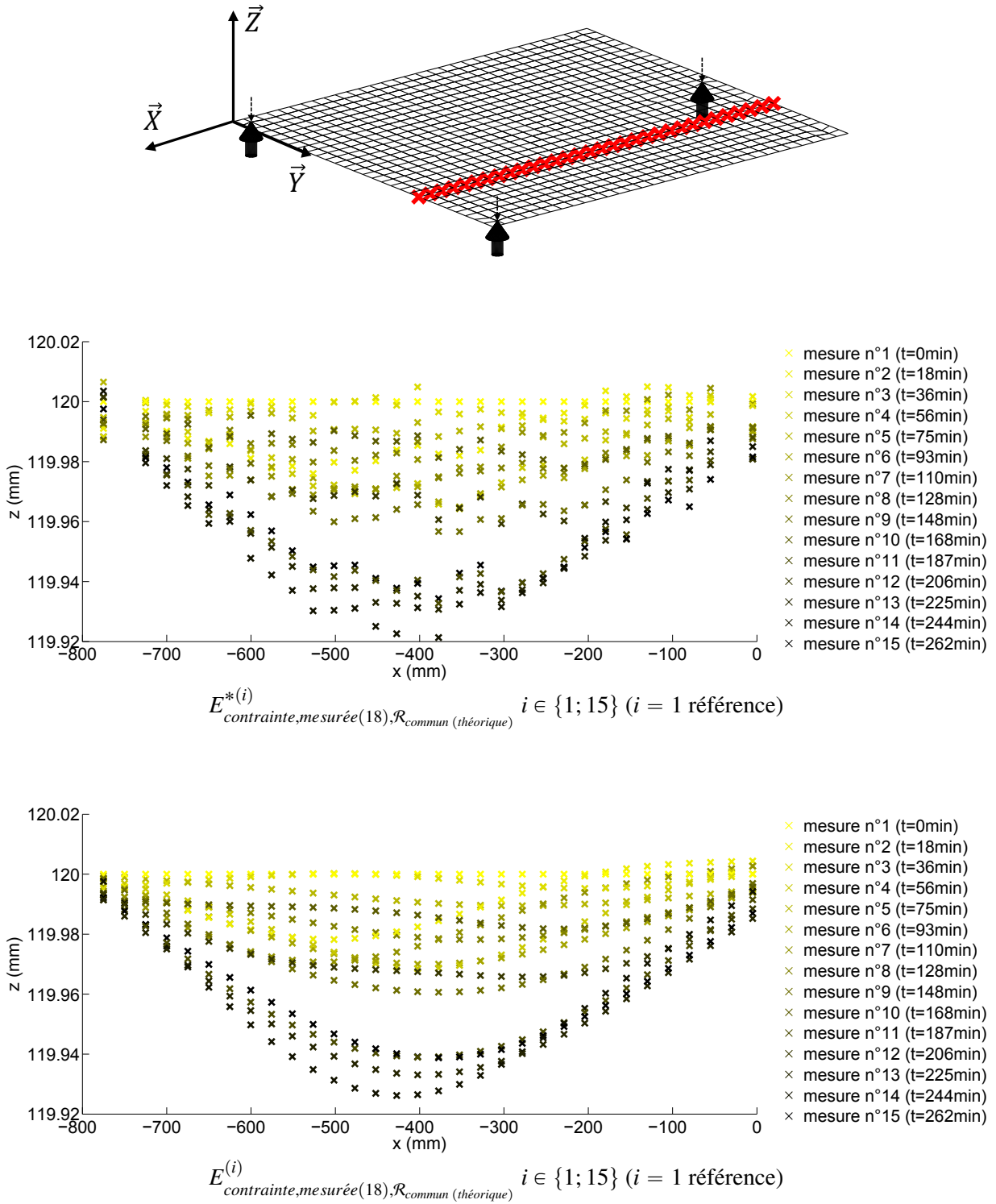


Figure E.2 – Evolution au cours du temps de la *géométrie contrainte* mesurée correspondant aux champs d'écart évalués (partiels et complets) par rapport à la première évaluation ($i = 1$ référence), dans une section donnée (ici section $y = 500mm$). Il y a environ $18min$ entre deux mesures consécutives.

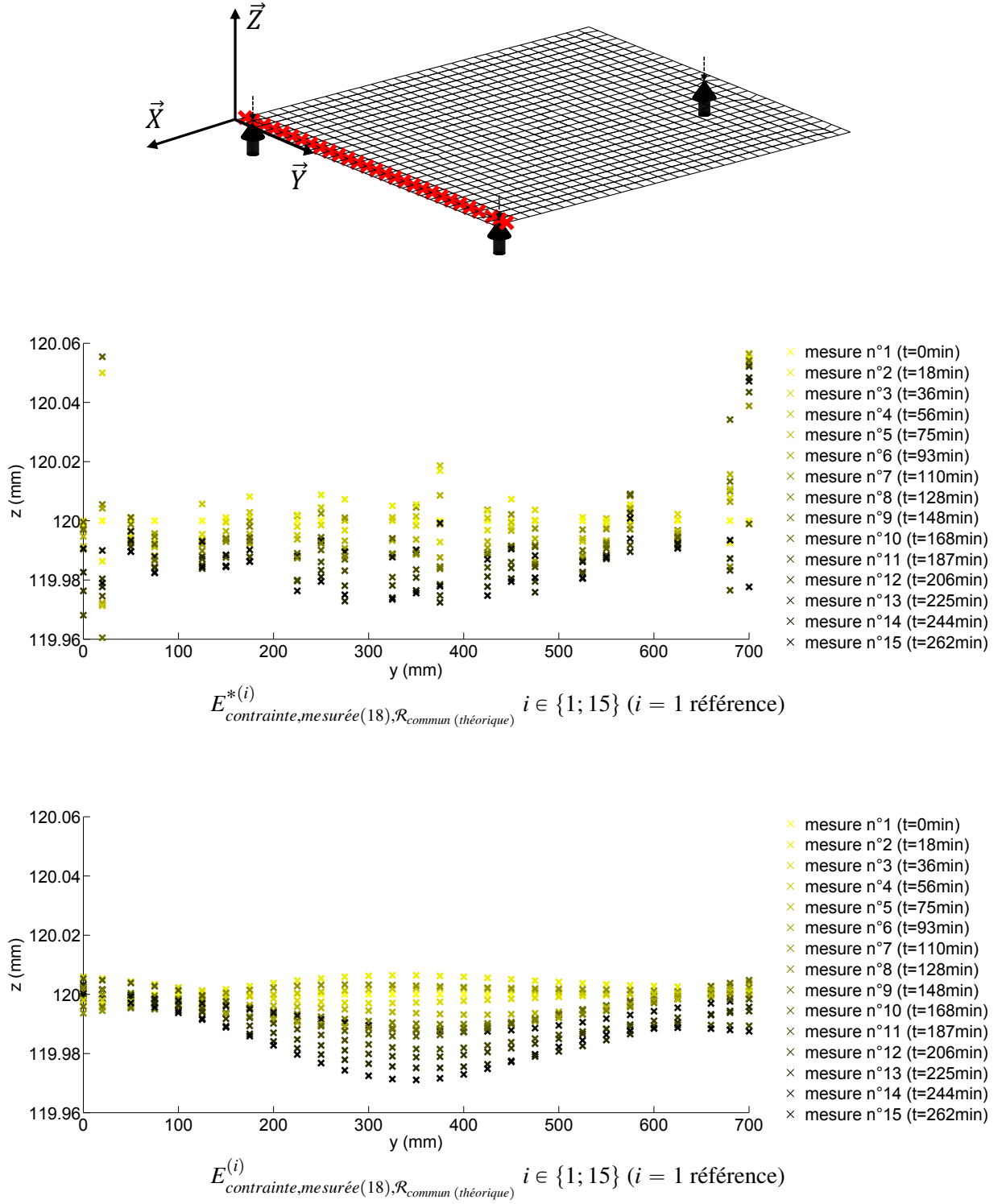


Figure E.3 – Evolution au cours du temps de la *géométrie contrainte* mesurée correspondant aux champs d'écarts évalués (partiels et complets) par rapport à la première évaluation ($i = 1$ référence), dans une section donnée (ici section $x = -25\text{mm}$). Il y a environ 18min entre deux mesures consécutives.

Caractérisation Géométrique des Assemblages Flexibles par la Mesure

RESUME : L'émergence des matériaux composites dans le domaine aéronautique a permis d'alléger considérablement les structures. Cependant l'adaptation du processus d'assemblage aux contraintes imposées par la présence de ces matériaux n'est pas encore complète. De nombreuses opérations considérées comme non-productives sont nécessaires pour garantir le respect des nouvelles exigences. Dans le cadre du projet européen *LOCOMACHS*, l'utilisation d'un outil de simulation d'assemblage est envisagée afin de limiter le recours à ces opérations. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de la validation, par la mesure, des modèles utilisés pour la simulation d'assemblage flexible.

Une méthode d'évaluation de la géométrie d'un composant souple est mise en œuvre afin de compenser par simulation numérique les effets de l'environnement sur le composant lors de sa mesure. Une analyse de sensibilité de la méthode aux variations des différents paramètres de mesure et de simulation est réalisée afin de définir un cadre pour la mise en œuvre. Une analyse modale des écarts à une géométrie de référence contribue à la correction de certains paramètres du modèle utilisé pour réaliser la compensation par simulation. Cette géométrie de référence est obtenue par une méthode de retournement appliquée dans un contexte flexible, afin d'annuler certains effets de l'environnement sur la géométrie mesurée du composant.

Le jeu entre les composants assemblés est la caractéristique géométrique prépondérante dans un assemblage de structure aéronautique composite. La simulation d'assemblage, à partir des mesures réalisées sur les composants souples, permet d'évaluer le jeu entre les composants avant leur assemblage. Des méthodes de mesure de jeu dans un assemblage de composants souples sont proposées, et leur mise en œuvre expérimentale est réalisée. La confrontation des jeux mesurés et simulés permet de souligner d'une part les performances de l'outil de simulation, et d'autre part les difficultés liées à la modélisation des environnements de mesure et d'assemblage réels.

MOTS-CLES : Assemblage flexible, Caractérisation géométrique, Mesure, Défauts géométriques, Simulation de déformées, Jeu, Validation expérimentale, *LOCOMACHS*.

Geometrical Characterization of Flexible Assemblies by Measurement

ABSTRACT: The emergence of composite materials in aeronautics leads to lighter structures. However, these new materials induce new constraints to the assembly process. The adaptation is not yet complete. Indeed many operations are necessary to respect the new requirements, but are considered as non-productive. In the context of the European project *LOCOMACHS*, an assembly simulation tool is developed to limit the use of these operations. This thesis relates to the validation, from the measure, of the models used for flexible assembly simulation.

A method to evaluate the geometry of a flexible component is implemented. The method compensates, by simulation, the effects of the environment on the component during its measurement. A sensitivity analysis of the method against changes in various measurement parameters and simulation parameters is performed in order to define a framework for implementation. Parameters of the model used to perform the compensation by simulation are not representative of the actual behavior. A modal analysis of deviations to a chosen reference geometry contributes to the adjustment of these parameters. This reference geometry is obtained by a reversal method applied in a flexible context to cancel some of the effects of the environment on the measured geometry of the component.

The gap between the assembled components is the geometric key characteristic in an assembly of aeronautical composite structure. The assembly simulation, from measuring data of flexible components, enables to evaluate the gap between the components prior to assembly. Gap measurement methods in an assembly of flexible components are proposed, and they have been experimentally performed. The comparison of measured and simulated gaps highlights the performance of the simulation tool, and the difficulties in modeling actual measurement environment and actual assembly environment.

KEYWORDS: Flexible Assembly, Geometrical Characterization, Measurement, Geometrical deviations, Simulation of deflections, Gap, Experimental validation, *LOCOMACHS*.